

BRUNO NAHUILI BRESSAN

**Desenvolvimento de Sistema e Metodologia Para
Avaliar a Influência da Temperatura em Medidas de
Tensão de Retorno em Cabos Isolados em XLPE**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Renê Robert

Curitiba
2006

Dedico este trabalho:

*à minha filha Luise Bressan e minha esposa Luciene,
pelo apoio e confiança.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas com quem convivi durante a realização deste trabalho, em especial as que tive contato por meio do LACTEC.

Agradecimentos especiais ao Prof. Dr. Renê Robert, meu orientador, e ao Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho, por todos os ensinamentos na área de pesquisa, bem como na busca pela forma de melhor utilizar os conhecimentos adquiridos.

Agradecimento especial também ao Dr. Guilherme Cunha da Silva, coordenador do projeto de Tensão de Retorno, que em muito auxiliou direcionando a elaboração e desenvolvimento deste trabalho, tornando possível sua conclusão.

Agradeço aos colegas de pesquisa; José Manoel, Ricardo José Ferracin, Fernando Piazza, Marilda Munaro, Eduardo Massahiko Higashi, Walmor Cardoso Godoi, Sebastião Ribeiro Junior, Rafael Pires Machado, Marina Mieko Nishidate Kumode, pelas discussões de temas que, de uma forma ou de outra, contribuíram ao meu trabalho e à minha pessoa.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia (PIPE) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), que permitiram com que eu fizesse parte do corpo de pessoas que por ali passaram e contribuíram com o histórico destas instituições.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS E TABELAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	viii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Apresentação	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Cabos Isolados.....	4
2.1.1 Características do Polietileno (PE).....	5
2.1.2 Mecanismos de Envelhecimento e Degradação	7
2.1.2.1 Arborescência em Água (Water Tree).....	7
2.1.2.2 Arborescência Elétrica (Electrical Tree)	9
2.2 Polarização Dielétrica	10
2.3 Técnica de Tensão de Retorno	13
2.3.1 Teste de Ponto Único	16
2.3.2 Fatores que Afetam as Medidas de Tensão de Retorno	18
2.4 Características de um Sistema de Medida de Tensão de Retorno.....	19
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	22
3.1 Desenvolvimento do Sistema de Medida de Tensão de Retorno.....	22
3.1.1 Câmara de Teste.....	23
3.1.2 Sistema para Controle da Temperatura	24
3.1.3 Sistema de Comutação das Etapas da Tensão de Retorno	24
3.1.4 Circuito de Controle da Chave de Comutação	27
3.1.5 Computador e Programas.....	28
3.2 Descrição e Preparo das Amostras	30
3.3 Parâmetros e Procedimentos Adotados para as Medidas de Tensão de Retorno	31

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Determinação das Características do Sistema de Medida.....	33
4.1.1 Determinação da Impedância do Sistema de Medida	33
4.1.2 Avaliação da Indução do Sistema	37
4.1.3 Determinação do Tempo de Carga.....	38
4.2 Medidas de Tensão de Retorno em Função da Temperatura	40
4.3 Determinação da Presença de Arborescências em Água nas Amostras de Cabo Envelhecido.....	45
5 CONCLUSÕES.....	48
6 TRABALHOS FUTUROS	49
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 – Representação esquemática de um cabo isolado.....	4
Figura 2 - Arborescência em água (a) tipo gravata borboleta e (b) tipo canal ^[8]	8
Figura 3 - Arborescência elétrica proveniente de uma arborescência em água ^[8]	8
Figura 4 – Arborescência elétrica induzida a partir de um eletrodo em forma de agulha ^[8]	9
Figura 5 – Representação esquemática do circuito de testes para medida de tensão de retorno...	13
Figura 6 – Representação esquemática de uma medida de tensão de retorno.....	14
Figura 7 - Características de curvas de tensão de retorno, para uma mesma tensão de carga, de cabos em diferentes estágios de envelhecimento.	17
Figura 8 - Circuito equivalente amostra / dispositivo de medida, onde: R_n e C_n são os mecanismos de polarização independentes e discretos, R_o e C_o são a impedância e capacitância da amostra, e R_m é a impedância do circuito de medida.....	20
Figura 9 - Representação esquemática do sistema utilizado para realização das medidas de tensão de retorno.....	22
Figura 10 – Câmara de teste com controle da temperatura interna.	23
Figura 11 – Sistema de controle da temperatura.	24
Figura 12 - Chave eletromecânica de alta impedância.....	25
Figura 13 – Esboço da configuração interna da chave. Com os contatos na posição 1 ocorre a carga, na posição 2 ocorre o curto-circuito, e na posição 3 ocorre o processo de medida. ...	25
Figura 14 – Representação esquemática do circuito eletrônico para controle automatizado da chave.....	27
Figura 15 - Janela do programa de controle do circuito.....	28
Figura 16 – Detalhamento da preparação das pontas dos cabos isolados.	31
Figura 17 – Diagrama das impedâncias envolvidas em uma medida de tensão de retorno	34
Figura 18 – Curvas de descarga obtidas para determinação da impedância do sistema.	36
Figura 19 - Curvas de tensão, obtidas por meio do "zero test".	37
Figura 20 - Máximos valores de tensão de retorno em função de diferentes tempos de carga, obtidos da amostra de cabo novo.....	39
Figura 21 - Máximos valores de tensão de retorno em função de diferentes tempos de carga, obtido da amostra de cabo envelhecido.....	39

Figura 22 – Gráficos das curvas de tensão de retorno obtidas em função da temperatura. Amostras novas 1, 2 e 3; a), b) e c) respectivamente, amostras envelhecidas 1, 2 e 3; d), e) e f) respectivamente.....	41
Figura 23 – Comparação entre curvas de tensão de retorno obtidas para as três amostras de cabo novo.	42
Figura 24 – Comparação entre curvas de tensão de retorno obtidas para as três amostras de cabo envelhecido em campo.	42
Figura 25- Gráfico dos valores das tensões de retorno máxima (U_m), em função da temperatura.	43
Figura 26 - Gráfico dos tempos para ocorrer os máximos de tensão de retorno (t_m), em função da temperatura.	44
Figura 27 - Amostra de cabo isolado, envelhecido em campo, após condicionamento em solução de azul de metileno.	46
Figura 28 - a) Equipamento de corte, LEICA, b) Microscópio ótico, NIKON.	46
Figura 29 - Arborescências em água encontradas nos trechos dos cabos isolados envelhecidos utilizados nas medidas de tensão de retorno.....	47
 Tabela 1 - Propriedades dos polímeros XLPE, HDPE e LDPE.	6
Tabela 2 – Descrição das amostras de cabos novo e envelhecido, utilizadas nos testes de tensão de retorno.	30
Tabela 3 – Valores retirados das curvas de descarga utilizados para obter o valor aproximado da impedância do sistema.	36

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

C	Capacitância
\vec{D}	Vetor deslocamento elétrico
$\vec{E}(t)$	Vetor campo elétrico
ε_0	Permissividade elétrica do vácuo
\vec{P}	Vetor de polarização dielétrica
$\vec{P}_i(t)$	Vetor polarização instantânea
$\vec{P}_s(t)$	Vetor polarização lenta
R_m	Impedância do sistema de medida
τ	Tempo de relaxação
t_c	Tempo de carga
t_d	Tempo de descarga
t_m	Tempo em que ocorrer o valor máximo da tensão de retorno
U_0	Tensão de carga
U_m	Valor máximo da tensão de retorno
V	Tensão elétrica
\mathcal{E}	Tensão eletromotriz
χ_i	Susceptibilidade elétrica
χ_s	Susceptibilidade de polarização oriental

AC	Corrente Alternada (Alternate Current)
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DC	Corrente Contínua (Direct Current)
HDPE	Polietileno de Alta Densidade (High Density Polyethylene)
HV	Alta Tensão (High Voltage)
LDPE	Polietileno de Baixa Densidade (Low Density Polyethylene)
PE	Polietileno
RVM	Return Voltage Measurement
XLPE	Polietileno Entrecruzado (Crosslinked Polyethylene)

RESUMO

Um dos maiores problemas que afetam a confiabilidade dos cabos elétricos isolados utilizados em redes subterrâneas é a degradação da isolação conhecida como arborescência em água. Este fenômeno se origina a partir da combinação de umidade com estresse elétrico podendo evoluir para arborescência elétrica que, num estágio posterior, pode levar à ruptura da isolação do cabo. Medidas de tensão de retorno constituem um método que pode ser utilizado para detectar e acompanhar a evolução destas arborescências. Instalados em dutos ou diretamente no solo, os cabos ficam sujeitos à variação de temperatura ambiente, assim, avaliar a influência da temperatura nas medidas de tensão de retorno é de fundamental importância para evitar falsas interpretações dos resultados obtidos e, conseqüentemente, evitar um falso diagnóstico sobre o estado de degradação do cabo. Este trabalho traz detalhes de um equipamento construído para realização de medidas de tensão de retorno em amostras de cabos isolados, mantidos sobre diferentes temperaturas. A primeira parte dos resultados obtidos valida o correto funcionamento do sistema construído. A segunda parte dos resultados mostra como a temperatura influencia de forma diferente em medidas de tensão de retorno realizadas em amostras de cabos novos e envelhecidos em campo, isolados em polietileno entrecruzado (XLPE). Este resultado contribui para que, quando da realização destas medidas em campo, não haja falsas interpretações no diagnóstico devido ao fator temperatura.

ABSTRACT

One of the largest problems that affects the reliability of isolated electrical cables applied in underground power cable network is the degradation of isolation known as water tree. This phenomena is originated by combination of humidity and electric stress and can also evolve into an electrical tree that in a posterior stage can carry out to the electrical breakdown of the cable. Return voltage measurement constitutes one method that can be used for detection and accompaniment of the water tree growth. Installed in duct or directly on the ground, the cable is subject to the temperature variations of the environment, in this way, evaluate the temperature influence in return voltage measurements is of fundamental importance to avoid false interpretations of the obtained results and, consequently, to avoid a false diagnosis on the state of cable degradation. The first part of the results obtained validate the correct operation of the built system. The second part of the results shows how the temperature influences in different forms in measures of return voltage accomplished in new and aged samples of cables in fields, isolated in crosslinked polyethylene (XLPE). This result contributes so that, when these measures are accomplished in field, there will not have any false interpretations in the diagnosis due to the factor temperature.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da competição no setor elétrico tem forçado as concessionárias de energia a reduzir os custos do ciclo de vida dos equipamentos elétricos por meio da redução dos custos em manutenção e de investimentos posteriores para extensão da vida útil dos mesmos. Por outro lado, a taxa de falhas dos equipamentos elétricos tem de ser baixa. Uma das estratégias para atingir estes requisitos é a aplicação de métodos de diagnóstico confiáveis para avaliação dos sistemas de isolamento de equipamentos elétricos ^[1].

Um dos problemas que tem afetado a confiabilidade dos sistemas de distribuição elétrica subterrâneos que utilizam cabos de potência isolados é o fenômeno conhecido como arborescência em água ^[2, 3]. Este fenômeno ocorre na isolação dos cabos de potência devido à ação simultânea de umidade e campo elétrico, tendo como consequência a difusão de água na estrutura do material dielétrico. A difusão da água causa o surgimento de canais micrométricos que assumem uma estrutura ramificada na forma de arbusto ^[3, 4]. A propagação das arborescências em água ao longo da espessura da isolação ou a conversão destas em arborescências elétricas constituem pontos de fraqueza no dielétrico, o qual pode em última instância, levar à ruptura da isolação ^[4, 5]. Em alguns países europeus aproximadamente 25% das falhas nos sistemas elétricos dos cabos de potência foram atribuídas à presença de arborescências em água ^[1]. Diferentes métodos são utilizados para detecção e diagnóstico de arborescências água em cabos de potência, entre os quais estão as medidas de tensão de retorno.

É conhecido que o valor e a forma da tensão de retorno em cabos de potência possuem correlação com a presença de arborescências em água na isolação ^[6]. Todavia, pouca informação concreta há na literatura sobre a influência da temperatura nestas medidas. Deve ser observado que esta informação é importante para que se realize uma correta interpretação dos resultados e, conseqüentemente, um correto diagnóstico sobre o estado atual do cabo.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema que possibilite realizar medidas de tensão de retorno em amostras de cabos de média tensão isolados em polietileno entrecruzado (XLPE) sob diferentes temperaturas e, dessa forma, possibilite estimar a influência da temperatura nestas medidas. Pretende-se com isto contribuir para o preenchimento de parte da lacuna existente na literatura.

O agente motivador deste trabalho foi à necessidade, por parte da COPEL (Companhia Paranaense de Energia), de desenvolver um laboratório móvel que possibilite a detecção e localização de falhas na rede, e também a realização do diagnóstico do estado de envelhecimento dos cabos isolados instalados na rede de distribuição subterrânea da cidade de Curitiba. Uma das técnicas que foram sugeridas para estudo e implantação no laboratório móvel foi a técnica de tensão de retorno.

1.2 Apresentação

A apresentação do trabalho foi feita da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica dos estudos realizados, iniciando com a descrição dos aspectos constitutivos dos cabos isolados utilizados nas redes elétricas subterrâneas, bem como das características do material dielétrico isolante que compõe estes cabos, o XLPE. Também são descritos os principais mecanismos de degradação destes materiais dielétricos, sendo dada ênfase ao mecanismo de degradação conhecido como arborescência em água. Após uma descrição do processo de polarização de materiais dielétricos, é apresentada a técnica de tensão de retorno, sendo discutidas as condições para sua formação bem como de sua aplicação como método de diagnóstico. Na sequência é apresentado o teste de ponto único e, posteriormente, são descritos os fatores que influenciam nas medidas de tensão de retorno, e ao final deste capítulo são descritas as características de um sistema de medida de tensão de retorno.

Os procedimentos experimentais são apresentados no Capítulo 3, onde inicialmente é feita uma descrição do arranjo experimental, onde são apresentadas as características do sistema de medida desenvolvido, sendo dada maior ênfase aos equipamentos desenvolvidos durante este trabalho; a chave de comutação, o sistema de controle da temperatura e o circuito, com seu respectivo programa, para controle do tempo de carga e de descarga da chave de comutação. Ainda neste capítulo, são descritos as características e o processo de preparação das amostras de cabo utilizados nas medidas de tensão de retorno. Por fim, são descritos todos os parâmetros e procedimentos adotados para realização das medidas de tensão de retorno.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação e discussão dos resultados experimentais. A primeira parte deste capítulo é dedicada aos resultados relacionados à determinação das características do sistema de medida desenvolvido. Posteriormente, são apresentadas as medidas de tensão de retorno em função da temperatura realizadas nas amostras de cabos, isolados em XLPE, novos e envelhecidos em campo. Ao final deste capítulo é apresentado o resultado do procedimento realizado para confirmação da existência de arborescências em água nas amostras de cabo envelhecido em campo.

As conclusões obtidas são apresentadas no Capítulo 5, e sugestões para trabalhos futuros no Capítulo 6, e por ultimo, no Capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cabos Isolados

Os cabos isolados utilizados em redes elétricas subterrâneas são constituídos por quatro elementos básicos; proteção externa, blindagem metálica, condutor e sistema de isolamento. O sistema de isolamento é constituído de material dielétrico isolante e camadas semicondutoras, interna e externa. Na Figura 1 está ilustrado esquematicamente, um cabo isolado ^[7].

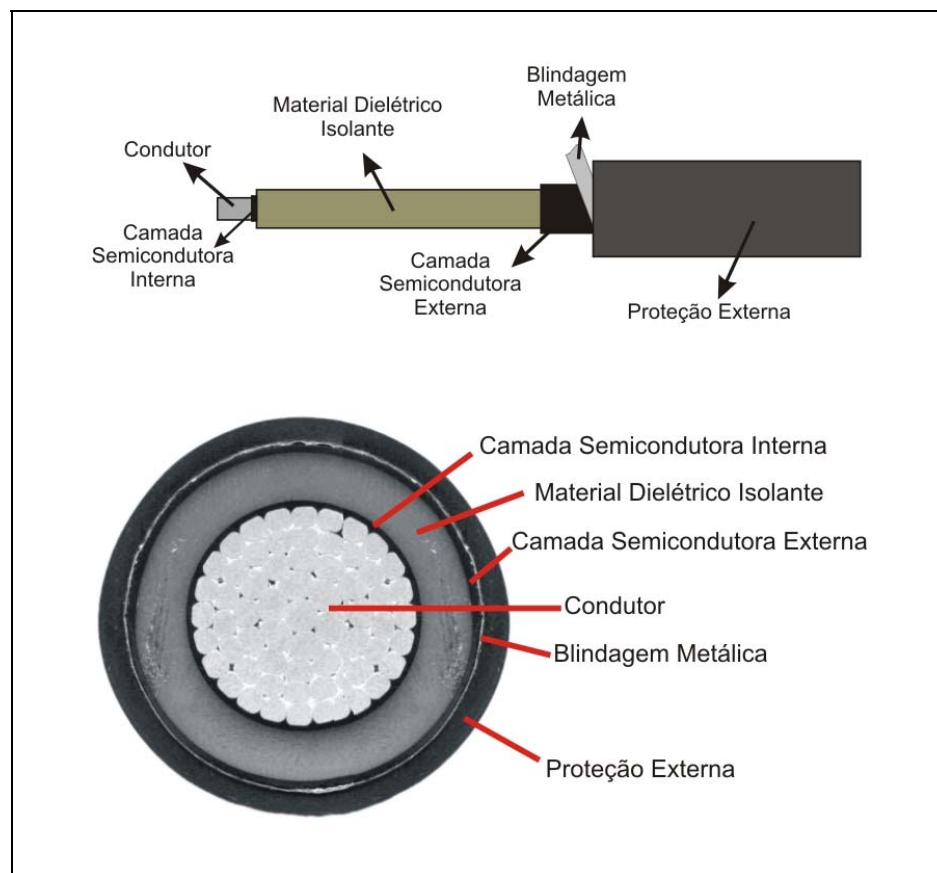


Figura 1 – Representação esquemática de um cabo isolado.

A proteção externa tem a finalidade de sustentar e proteger os demais elementos contra esforços mecânicos e contra a penetração de água e de outros agentes externos. Esta pode ser composta por uma única camada extrudada, ou por uma combinação de reforços mecânicos,

como fios, fitas metálicas ou capas metálicas. No caso de cabos de média tensão, a blindagem metálica serve como um condutor para transporte das correntes de carga capacitiva e de curto-circuito do sistema ^[7].

O condutor metálico é o elemento responsável pelo transporte de energia elétrica, podendo ser unipolar ou multipolar quando possui, respectivamente, um ou mais condutores independentes ^[7].

Quando o cabo está em operação, o material dielétrico isolante é responsável pela isolação elétrica do condutor, o material dielétrico isolante fica sujeito ao campo elétrico gerado entre o condutor e a blindagem devido à diferença de potencial gerada entre estes. As camadas semicondutoras, interna e externa, têm a função de homogeneizar o campo elétrico que atua sobre o material dielétrico isolante devido suas propriedades semicondutoras e também por praticamente eliminar a possibilidade de formação de bolhas nas interfaces com o material dielétrico, as quais são fontes de ocorrência de descargas parciais.

A vida útil de um cabo isolado é determinada principalmente pelas características da isolação. A isolação primária dos cabos de média tensão é composta por material dielétrico sólido extrudado. Entre os materiais utilizados, o polietileno entrecruzado (XLPE) ocupa posição de destaque no mercado ^[8].

2.1.1 Características do Polietileno (PE)

O polietileno ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$) é um polímero sintético obtido pelo processo de polimerização do monômero etileno (C_2H_4). Este polímero possui excelentes propriedades elétricas, entre as quais podem ser citadas: alta resistividade volumétrica, baixa permissividade, baixo fator de dissipação e alta rigidez dielétrica em corrente alternada e impulso ^[7, 9]. Dependendo das condições impostas no processo de polimerização (adição de catalisadores, condições de temperatura e pressão), obtém-se o polietileno de baixa densidade (LDPE) ou o polietileno de alta densidade (HDPE). O LDPE e o HDPE são materiais poliméricos termoplásticos que podem ser moldados por etapas de aquecimento, moldagem e resfriamento.

O processo de entrecruzamento dá origem a um grande número de ligações entre as cadeias do polímero, aumentando seu peso molecular e reduzindo a mobilidade entre estas

cadeias. Esta característica confere ao material uma excelente estabilidade térmica quando submetido a elevadas temperaturas [7, 9, 10].

Composto por um grande número de carbonos terciários em sua estrutura, o que possibilita maior número de ligações entre cadeias, normalmente é a partir do LDPE que se obtém o polietileno entrecruzado (XLPE), amplamente utilizado como material dielétrico isolante em cabos de potência. A excelente estabilidade térmica permite que mais potência possa ser transportada para uma mesma seção do condutor do que um cabo com isolamento em polietileno não entrecruzado, o que reduz perdas principalmente em sistemas onde se tem alto nível de curto-circuito. Com esta característica o XLPE suporta temperaturas de 90 °C a 105 °C, em regime permanente, e 130 °C a 140 °C em regime de sobrecarga [7]. Na Tabela 1 estão apresentadas as principais propriedades dos materiais citados.

Tabela 1 - Propriedades dos polímeros XLPE, HDPE e LDPE.

Propriedades	LDPE	HDPE	XLPE
Rigidez dielétrica (kV/mm)	75	100	50
Permissividade relativa (1kHz)	2,3	2,35	2,3
Resistividade volumétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$)	5×10^{17}	5×10^{17}	10^{16}
Fator de dissipação (1 kHz)	2×10^{-4}	2×10^{-4}	3×10^{-4}
Densidade (g/cm^3)	0,92	0,95	0,92
Resistência a tração (N/mm^2)	12	15	20
Módulo de Elasticidade (kN/mm^2)	0,15	0,7	0,1

Apesar das excelentes características elétricas e térmicas do XLPE, tem sido mostrado que este material polimérico apresenta mecanismos de envelhecimento e degradação quando submetido a diferentes estresses, os quais podem levar à ruptura elétrica do material [11].

2.1.2 Mecanismos de Envelhecimento e Degradação

Em condições normais de operação, os cabos isolados ficam sujeitos a diversos tipos de estresses, entre os quais pode-se citar: estresse elétrico (tensão e frequência de operação), térmico (variações da temperatura ambiente e temperatura de operação), mecânico (vibração, torção) e ambiental (umidade e contaminação por agentes químicos) ^[12, 13, 14].

Atuando individualmente ou de forma combinada estes múltiplos estresses aceleram o processo de envelhecimento, o qual com o passar do tempo pode causar mudanças irreversíveis nos materiais dielétricos prejudicando o desempenho requerido. Em estágios mais avançados de envelhecimento, ou a partir de defeitos de fabricação tais como bolhas e impurezas, tem-se o início do processo de degradação que, em última instância, podem levar à ruptura do sistema de isolamento ^[11]. As alterações provocadas no material isolante podem ser de natureza elétrica, dielétrica e físico-química. Monitorar algumas das propriedades afetadas por estas alterações possibilita o desenvolvimento de um processo de diagnóstico e avaliação do estágio atual de envelhecimento e degradação do material dielétrico dos cabos isolados ^[15].

Entre os mecanismos de degradação que ocorrem em cabos isolados estão as arborescências em água (*water tree*) e as arborescências elétricas (*electrical tree*) ^[11].

2.1.2.1 Arborescência em Água (*Water Tree*)

Em cabos isolados empregados em redes subterrâneas, a principal causa do surgimento e desenvolvimento de arborescências em água é a ação combinada da umidade e do campo elétrico. A arborescência em água consiste em mudanças locais permanentes na morfologia do material dielétrico, possivelmente associada com mudanças químicas, sendo que em todos os casos há associação com a precipitação local de água líquida. A região degradada é composta por estruturas difusas formadas por canais micrométricos em formato de arbusto, parcial ou totalmente preenchidos com água ^[16].

As arborescências se desenvolvem na direção do campo elétrico e são classificadas conforme as condições que possibilitam seu surgimento. As arborescências que se desenvolvem a partir da presença de vazios ou de impurezas no volume da isolamento são denominadas

“arborescência em forma de gravata borboleta” (*bow-tie tree*), conforme mostrado na Figura 2(a). Por outro lado, aquelas que iniciam seu crescimento na superfície de isolamento, geralmente a partir da camada semicondutora, são denominadas “arborescências em forma de canal” (*vented tree*)^[17] conforme mostrado na Figura 2(b).

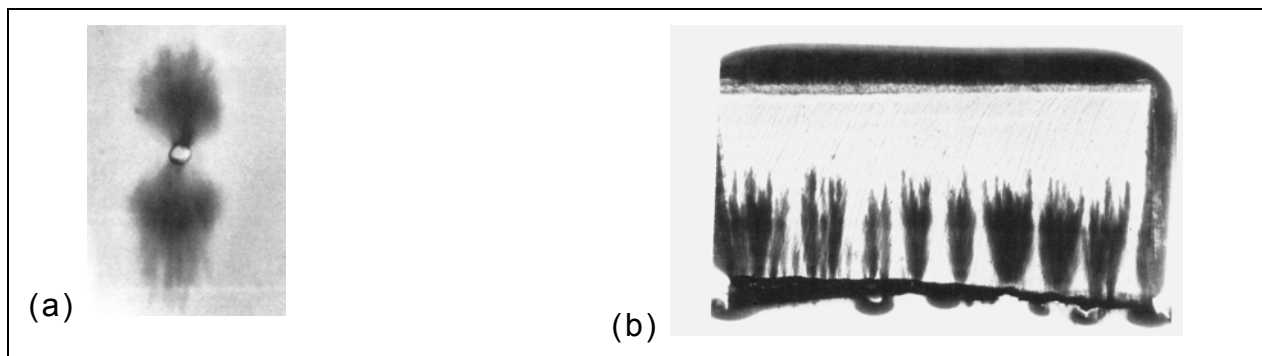


Figura 2 - Arborescência em água (a) tipo gravata borboleta e (b) tipo canal^[8].

Normalmente, o crescimento de arborescências em água não é acompanhado de descargas parciais detectáveis. A presença de um grande número de arborescência em água no material dielétrico causa a redução da rigidez dielétrica em corrente alternada (AC)^[8].

Embora existam diversas teorias que descrevem os fenômenos de arborescência, a compreensão dos efeitos sinérgicos entre os vários processos envolvidos ainda é bastante limitada. Todavia, parece haver um consenso de que três processos básicos estão presentes: (i) oxidação, (ii) quebra de cadeias e (iii) difusão de íons^[17].

Quando exposta a uma sobretensão, a arborescência em água pode converter-se em uma arborescência elétrica, tendo como consequência a eminente ruptura da isolamento^[17]. A Figura 3 mostra o resultado da conversão de uma arborescência em água em uma arborescência elétrica.



Figura 3 - Arborescência elétrica proveniente de uma arborescência em água^[8].

2.1.2.2 Arborescência Elétrica (*Electrical Tree*)

As arborescências elétricas têm início devido à presença de pontos de concentração de tensão, como vazios, cavidades e impurezas contidas no interior da isolação, juntamente com a ocorrência de descargas parciais. Quando o campo elétrico dentro do vazio excede um campo crítico, determinado pelas características dos gases presentes, dá-se início à ocorrência de descargas parciais, as quais levam à decomposição e carbonização do material, permitindo a formação de canais permanentes a partir do ponto de origem. Com direção de propagação paralela ao campo elétrico, as arborescências elétricas apresentam-se na forma de arbustos com estruturas ramificadas de tonalidade escura ^[11], sendo que se desenvolvem mais rapidamente do que as arborescências em água, podendo este crescimento ser extremamente rápido quando submetido a impulsos produzidos por surtos ou descargas atmosféricas ^[18].

Uma vez iniciada a arborescência elétrica torna-se uma questão de dias ou semanas para que ocorra a ruptura do sistema de isolação ^[11]. Na Figura 4 está apresentado o resultado do crescimento de uma arborescência elétrica induzido por um eletrodo em forma de agulha.

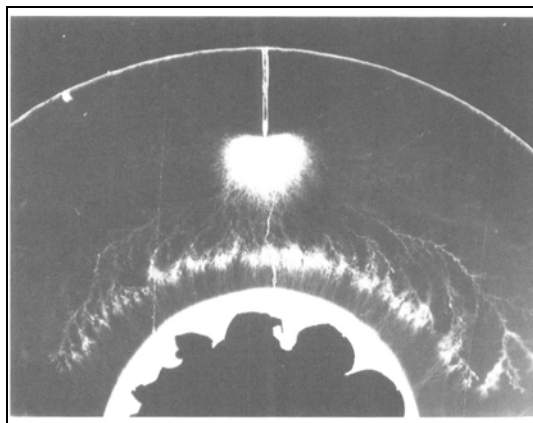


Figura 4 – Arborescência elétrica induzida a partir de um eletrodo em forma de agulha ^[8].

2.2 Polarização Dielétrica

Meios materiais são compostos de átomos, que por sua vez são constituídos de partículas carregadas, núcleos atômicos e elétrons. Em um material dielétrico, a distribuição das cargas possui uma configuração originalmente neutra.

Um campo elétrico aplicado sobre o material dielétrico altera sua configuração por meio do deslocamento nas posições de equilíbrio de toda a carga positiva em relação à carga negativa. Limitado por forças restauradoras, originadas pela mudança da configuração original das cargas, este deslocamento pode originar dipolos induzidos ou orientação de dipolos permanentes, estabelecendo uma polarização do material dielétrico.

Para campos elétricos aproximadamente estáticos \vec{E} , aplicados sobre um material dielétrico linear, podemos escrever o vetor polarização dielétrica \vec{P} como uma grandeza proporcional ao vetor campo elétrico:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} \quad (1)$$

onde ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo, e χ é a susceptibilidade elétrica do material.

Uma diferença de potencial aplicada entre placas paralelas, isoladas à vácuo, de um capacitor dá origem à um vetor de indução denominado deslocamento elétrico \vec{D} , proporcional ao vetor campo elétrico \vec{E} , sendo a relação entre estes dada por:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (2)$$

Considerando que um material dielétrico separa as placa do capacitor, o deslocamento elétrico é acrescido de uma polarização $\vec{P}(t)$, cuja dependência temporal surge devido ao tempo necessário para que a polarização atinja um valor de equilíbrio após variação do campo elétrico aplicado:

$$\vec{D}(t) = \epsilon_0 \vec{E}(t) + \vec{P}(t) \quad (3)$$

Diferentes mecanismos podem estar envolvidos no processo de polarização. Assim, enquanto alguns mecanismos respondem de forma instantânea à variação do campo elétrico aplicado, outros respondem com certo tempo de atraso (τ), denominado tempo de relaxação. Entre os principais mecanismos que podem estar envolvidos no processo de polarização, podemos citar ^[19]:

Polarização eletrônica: tem origem no deslocamento da nuvem eletrônica em relação ao núcleo do átomo, ocorrendo em intervalos de tempos muito curtos, $\sim 10^{-15}$ s, sendo independente de fatores externos, por exemplo, a temperatura.

Polarização atômica (iônica ou molecular): resultado de um deslocamento mútuo entre íons constituintes da molécula, ocorrendo em curtos intervalos de tempo, $\sim 10^{-13}$ s, sendo praticamente independente da temperatura.

Polarização orientacional: origina-se da orientação, com o campo elétrico, de dipolos permanentes presentes no dielétrico, ocorrendo em intervalos de tempo relativamente lentos, $\sim 10^{-6}$ s, sendo fortemente dependente da temperatura.

Polarização interfacial: ocorre em materiais dielétricos não homogêneos, devido a formação de cargas espaciais nas interfaces entre regiões com diferentes condutividades e permissividades. Também tem origem devido à presença de “traps” (armadilhas), irregularmente distribuídos no material dielétrico, que acumulam cargas nestas regiões e dão origem à polarização. Ambos os casos são dependentes da temperatura, e contribuem para a polarização lenta.

Polarização por cargas espaciais: mesmo em dielétricos homogêneos, as imperfeições no contato entre o eletrodo e o dielétrico impedem que todos os portadores de carga se movam até o eletrodo, causando um acúmulo local de cargas nas interfaces destas imperfeições, e conseqüentemente distorcendo a forma do campo elétrico aplicado pelo eletrodo.

De uma forma geral, a polarização de um material dielétrico pode ser expressa como a soma de dois termos ^[20, 21]:

$$\vec{P}(t) = \vec{P}_i(t) + \vec{P}_s(t) \quad (4)$$

onde $\vec{P}_i(t) = \varepsilon_0 \chi_i \vec{E}(t)$ corresponde à polarização instantânea, com dependência linear ao campo, representado pela susceptibilidade elétrica χ_i , e $\vec{P}_s(t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t \chi_s(t - \tau) \vec{E}(\tau) d\tau$ corresponde à polarização lenta que depende de todos os campos elétricos previamente existentes, obedecendo o princípios de causalidade e superposição, onde χ_s é a susceptibilidade de polarização orientacional.

A partir de considerações de teoria de circuitos, B. Gross ^[22, 23], desenvolveu um formalismo que permite calcular a corrente que atravessa o dielétrico de um capacitor de placas planas e paralelas, sendo possível descrever o processo de tensão de retorno que ocorre no material dielétrico ^[21].

2.3 Técnica de Tensão de Retorno

Experimentalmente, o processo de polarização de materiais dielétricos ocorre em um dado intervalo de tempo após a aplicação do campo de polarização. Da mesma forma, após a retirada do campo de polarização seguido de um breve curto-circuito, também se observa um intervalo de tempo para ocorrer uma completa despolarização do material ^[22].

Após o curto circuito da amostra, inicia-se a despolarização de diferentes mecanismos envolvidos no processo de polarização. Como resultado da soma das despolarizações destes diferentes mecanismos, é verificado o “retorno” de uma tensão, em função do tempo ^[24].

Originalmente denominada “tensão de regeneração”, o surgimento desta tensão fez parte de um conjunto de fenômenos descritos como anomalias ^[22]. Também, denominada de “*after-effect*”, ou efeito posterior, este fenômeno é atualmente conhecido como tensão de retorno, “*return voltage*”.

O processo para realização de uma medida de tensão de retorno compreende três etapas, representadas esquematicamente pelas posições da chave *S* no circuito da Figura 5:

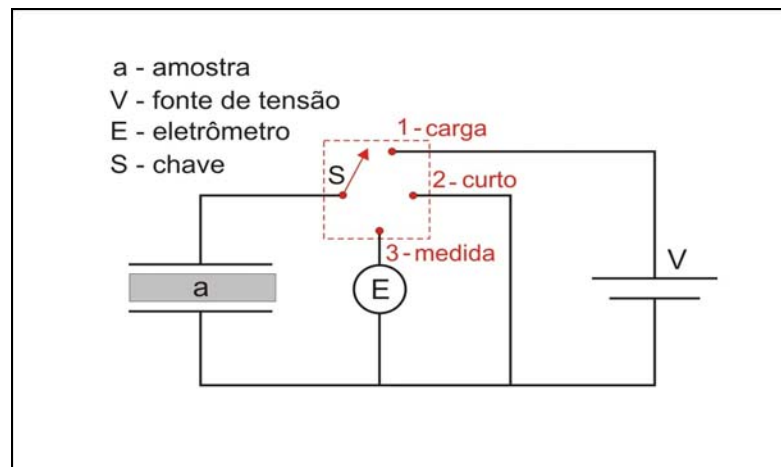


Figura 5 – Representação esquemática do circuito de testes para medida de tensão de retorno.

- 1- aplicação de uma tensão de carga (U_0) sobre a amostra durante um determinado período (t_c - tempo de carga).
- 2- curto-circuito da amostra durante um determinado período (t_d tempo de descarga).
- 3- medição da tensão de retorno por meio do eletrômetro.

Na Figura 6 são mostradas as formas das tensões resultantes durante estas etapas.

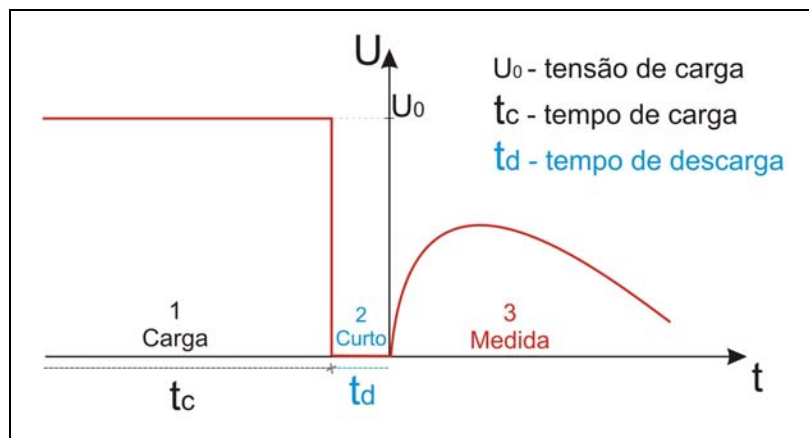


Figura 6 – Representação esquemática de uma medida de tensão de retorno.

A tensão aplicada (etapa 1) leva ao carregamento da capacitância geométrica, com conseqüente polarização do dielétrico. Do ponto de vista macroscópico, as cargas nos eletrodos podem ser consideradas compostas de cargas livres e cargas ligadas pelo processo de polarização. Na etapa 2, a retirada da tensão remove o campo aplicado sobre o dielétrico, e a aplicação de curto-circuito tem por objetivo remover as cargas livres presentes nos eletrodos do cabo. É iniciado o processo de despolarização do material dielétrico, resultando em uma corrente de deslocamento.

A despolarização continua durante o processo de medida (etapa 3) sendo que as cargas previamente ligadas se tornam cargas livres nos eletrodos. Devido ao acúmulo destas cargas livres nos eletrodos é que a tensão de retorno pode ser medida ^[26, 28].

O aumento da tensão de retorno com o tempo é o resultado de um decréscimo gradual da polarização, isto é, da relaxação dos dipolos excitados. Sem outras influências adicionais, ocorre um aumento contínuo da tensão de retorno. Com o aumento da tensão, processos de descarga externos devido à condução em componentes resistivos internos ou externos se tornam importantes e levam a posterior redução da tensão de retorno. Então, após alcançar um valor máximo, a tensão de retorno começa a diminuir ^[28].

As informações diretamente obtidas de uma curva de tensão de retorno são: o valor máximo da tensão de retorno (U_m) e o tempo para se atingir este máximo (t_m). Os valores destes parâmetros possuem uma dependência direta com as características do material analisado, bem como dos valores adotados para a tensão de carga, tempo de carga e tempo de descarga.

A primeira aplicação de medidas de tensão de retorno, *RVM* “*Return Voltage Measurement*”, como método de diagnóstico foi na avaliação da presença de umidade na isolação de papel impregnado com óleo utilizado em transformadores. Na década de 90 esta técnica começou a ser utilizada como método de diagnóstico preditivo para avaliar a presença de arborescências em água no interior da isolação de cabos de potência extrudados ^[25, 26, 27].

A isolação de cabos com arborescências em água apresenta uma resposta dielétrica não linear, explicada pelas seguintes teorias ^[25]:

- as arborescências são formadas por micro-lacunas, contendo água, interligadas por canais delgados de natureza isolante. Quando sob o efeito de campos elétricos intensos, os diâmetros destes canais são alargados devido à presença de água e se tornam condutivos, resultando em maiores perdas.
- tem sido explicado, também, que a tensão de retorno em cabos isolados em polietileno com arborescência é influenciada pelo aumento da injeção de cargas devido à presença de umidade ou pelo número de transportadores iônicos pré-existentes e deslocamento de carga espacial.

O método de medida de tensão de retorno se distingue dos outros métodos de diagnóstico que são focados no fenômeno de descargas parciais e na existência de arborescências elétricas. Como qualquer método novo a medida de tensão de retorno tem evoluído muito em termos de

conhecimento e experiência. Vale ressaltar que a maioria das interpretações das medidas de tensão de retorno tem um embasamento físico, enquanto outras permanecem empíricas até o presente momento ^[27]. Comparada com outras técnicas de diagnóstico no domínio do tempo como, por exemplo, medidas de corrente de relaxação, a medida de tensão de retorno apresenta a vantagem de ser menos sensível a ruídos, o que é um importante fator para medidas em campo ^[28].

2.3.1 Teste de Ponto Único

No teste de ponto único a medida de tensão de retorno é realizada utilizando um único valor de tensão de carga (U_o) ou algum múltiplo desta. A tensão de retorno como função do tempo fornece informação sobre o estado de envelhecimento de possíveis danos presentes na isolação de cabos de potência extrudados, especialmente no que diz respeito à presença de arborescências em água. Os parâmetros normalmente utilizados são: a tensão de retorno máxima (U_m), o tempo no qual este máximo ocorre (t_m) e a inclinação inicial da curva de tensão de retorno ^[25, 26, 27, 28].

O valor máximo de tensão de retorno é o parâmetro mais importante para determinar a condição do cabo. O valor deste máximo aumenta com a tensão de carga e com o tempo de carga, diminuindo com o tempo de descarga ^[29]. O valor da tensão de retorno máxima pode ser associado com a polarização do material isolante. Diversos estudos mostram que cabos envelhecidos apresentam valores da tensão de retorno máxima superiores aos cabos não-envelhecidos ^[30, 31, 32, 33]. Todavia, foi observado que o valor absoluto da tensão de retorno, analisado de forma individual, não constitui uma medida precisa para identificação de cabos danificados com isolação em PE. Apesar disto, quando em combinação com outros parâmetros - tempo de ocorrência do máximo e inclinação inicial - este valor absoluto pode ser útil como suporte na interpretação do diagnóstico.

A tensão de retorno atinge seu valor máximo mais rapidamente em função da degradação da isolação ^[33]. Estudos recentes mostram que o tempo no qual ocorre o valor máximo de tensão

de retorno é menor para amostras envelhecidas ^[32]. Kamenka ^[27] fez a seguinte ilustração com referência ao tempo de ocorrência da tensão de retorno máxima supondo dois cabos em diferentes estados, um com muitas arborescências em água de tamanho relativamente pequeno (constante de tempo = 100 s) e outro com somente uma arborescência em água bastante longa (constante de tempo = 500 s). Usando estas respectivas constantes de tempo em um teste simulado foi observado que quanto maior a arborescência em água mais tarde a tensão de retorno máxima é atingida. Desta forma, o tempo no qual o valor de tensão de retorno máxima ocorre é também um indicativo da taxa de crescimento da arborescência em água dominante. Se este valor máximo aparece anteriormente, pode ser inferido que a tensão de retorno e, então, o envelhecimento do cabo, é determinado por um número grande de arborescências em água de tamanho pequeno. Este parâmetro – tempo de ocorrência - indica somente uma tendência geral, ou seja, não identifica arborescências individuais. Um tempo t_m curto, é uma indicação de que o diagnóstico requer análise adicional, mesmo quando este apresenta diagnóstico dentro da normalidade. Um aumento em t_m na medida em que a tensão de carga aumenta tende a assinalar a existência de arborescências grandes e forte não-linearidade. Estes efeitos têm sido encontrados no campo, mas não tem ainda comprovação científica ^[27]. Na Figura 7 estão ilustradas curvas típicas de medidas de tensão de retorno.

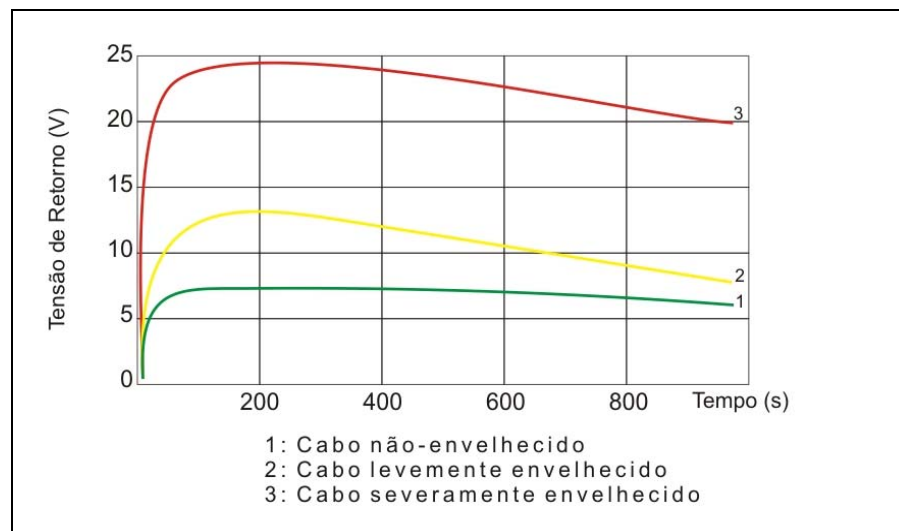


Figura 7 - Características de curvas de tensão de retorno, para uma mesma tensão de carga, de cabos em diferentes estágios de envelhecimento.

Os valores dos parâmetros obtidos da curva de tensão de retorno são altamente dependentes das propriedades do dielétrico sólido e variam de fabricante para fabricante, podendo apresentar variações até em cabos de diferentes lotes ^[27]. Uma avaliação confiável da condição de envelhecimento do cabo é somente possível se são conhecidas estas propriedades para o cabo não-envelhecido. Estas propriedades influem diretamente na inclinação inicial da curva de tensão de retorno. No início do teste a tensão de retorno sofre um rápido aumento até atingir o seu valor máximo. Na medida em que a isolação degrada o valor máximo da tensão de retorno é atingido em tempos menores. Isto leva a um aumento da inclinação inicial com o envelhecimento. Sendo assim, a inclinação inicial é um parâmetro que pode auxiliar na determinação do grau de envelhecimento e degradação do cabo ^[33]. Todavia, cálculos de tensão de retorno por meio de circuitos equivalentes mostram que a inclinação inicial da curva da tensão de retorno é independente dos tempos de relaxação dos processos internos. Desta forma, a utilização deste único parâmetro quantitativo não contém informação suficiente sobre o estado de envelhecimento de cabos em XLPE ^[38].

2.3.2 Fatores que Afetam as Medidas de Tensão de Retorno

As características dielétricas de uma isolação dependem fortemente da história prévia do material (elétrica, térmica, mecânica e química). No caso de medidas em campo, alguns destes fatores pouco influem, uma vez que normalmente o cabo está instalado há anos e, neste período, não esteve sujeito à esforços mecânicos consideráveis e ainda esteve continuamente estressado com a tensão nominal de trabalho e a temperatura de operação. Por outro lado, em medidas realizadas em laboratório estas condições normalmente não podem ser garantidas e os resultados obtidos apresentam dispersão significativa ^[38].

A presença de carga residual na isolação durante as medidas de tensão afeta os valores de tensão de retorno, principalmente os tempos para se atingir a tensão de retorno máxima ^[10, 27].

Em cabos de PE a presença de umidade aumenta o valor da tensão de retorno máxima^[34, 35], com conseqüente diminuição do tempo para ocorrer este máximo.

O processo de polarização e despolarização é acelerado a elevadas temperaturas^[35], tendo este mesmo resultado sido observado em medidas realizadas em transformadores de corrente com isolamento papel-óleo^[36, 37]. Apesar dos resultados relatados, há pouca informação sobre o efeito da temperatura nas medidas de tensão de retorno realizadas em cabos de potência.

2.4 Características de um Sistema de Medida de Tensão de Retorno.

A principal característica que um sistema de medida de tensão de retorno deve apresentar é uma elevada impedância de entrada R_m ¹, a qual é uma das condições que possibilita realizar medidas de tensão de retorno.

O estado das terminações, notadamente a resistência superficial entre os pontos de conexão (condutor e blindagem), afeta drasticamente (por meio da redução da impedância) a magnitude da tensão de retorno e o tempo de ocorrência deste máximo. Durante as medidas de tensão de retorno, a impedância do sistema (composta da impedância original do sistema e das impedâncias parasitas) fica em paralelo com a impedância total da amostra R_0 , cuja relação entre estas impedâncias é mostrada na equação 5:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_0} \quad \Rightarrow \quad R_{eq} = \frac{R_m R_0}{R_m + R_0} \quad (5)$$

onde, R_{eq} é a impedância equivalente do conjunto.

Analisando a equação 5, verifica-se que a impedância do conjunto é reduzida à um valor inferior à menor das resistências envolvidas. Assim, para evitar esta dificuldade e, portanto, assegurar a qualidade das medições são sugeridos cuidados com a limpeza dos contatos, cuidado

¹ A impedância é normalmente representada por Z , mesmo assim optou-se em adotar o símbolo R para representar a impedância já que neste trabalho estão envolvidas apenas tensões contínuas (com variação relativamente lenta) e resistências com elevado valor, condição na qual pode-se assumir que a impedância é igual à resistência.

no preparo das terminações e verificação da não existência de contatos acidentais entre terminações e blindagens^[10, 27].

Com o intuito de avaliar a influência do sistema de medida nos valores de tensão de retorno, normalmente se utiliza um circuito equivalente para representar a interconexão entre a amostra e o sistema de medida. Uma primeira aproximação para modelar o comportamento de relaxação é a resposta clássica de Debye^[38], a qual está representada na Figura 8. Segundo Hoff^[38], para que as medidas de tensão de retorno forneçam resultados que possam ser interpretados, a seguinte condição deve ser satisfeita: $R_m > R_o$. É indicado que as medidas de tensão de retorno sejam realizadas com um sistema com impedância de entrada $> 10^{12} \Omega$, de forma a garantir resultados interpretáveis. Medidas com valor menor de R_m são úteis somente para realização de diagnóstico com embasamento empírico. Apesar de ser útil para avaliar a influência do sistema de medida nos valores de tensão de retorno o circuito equivalente, mostrado na Figura 8, não é capaz de descrever o comportamento do material isolante^[38].

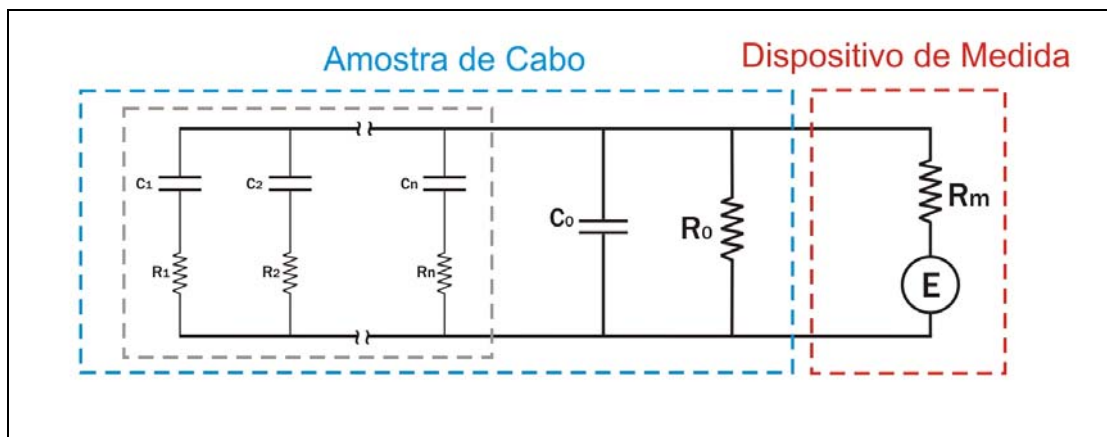


Figura 8 - Circuito equivalente amostra / dispositivo de medida, onde: R_n e C_n são os mecanismos de polarização independentes e discretos, R_o e C_o são a impedância e capacitância da amostra, e R_m é a impedância do circuito de medida.

Comercialmente, poucos são os equipamentos de medidas de tensão de retorno. Se destacam as marcas TETTEX e SebaKMT. A grande maioria dos equipamentos comerciais, têm aplicação específica na avaliação da condição da isolação de transformadores de potência,

isolados com papel impregnado com óleo ^[39, 40], sendo encontrado em algumas literaturas a utilização destes equipamentos para realizar medidas em cabos com isolação sólida ^[37].

Desenvolvido em cooperação com a Universidade de Siena, o modelo CD31, comercializado pela sebaKMT, possui aplicação direta na realização de medidas de tensão de retorno em isolação sólida de cabos isolados em PE/XLPE ^[41]. Opera com tensões de até $2 \times U_0$ (35 kV), e realiza automaticamente as medidas de tensão de retorno. Requer um computador com Windows 95/98 instalado.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Desenvolvimento do Sistema de Medida de Tensão de Retorno

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema para realização de medidas de tensão de retorno em amostras de cabos isolados em XLPE. O sistema desenvolvido foi utilizado para avaliar a influência da temperatura em medidas de tensão de retorno. Uma representação esquemática deste sistema é apresentada na Figura 9.

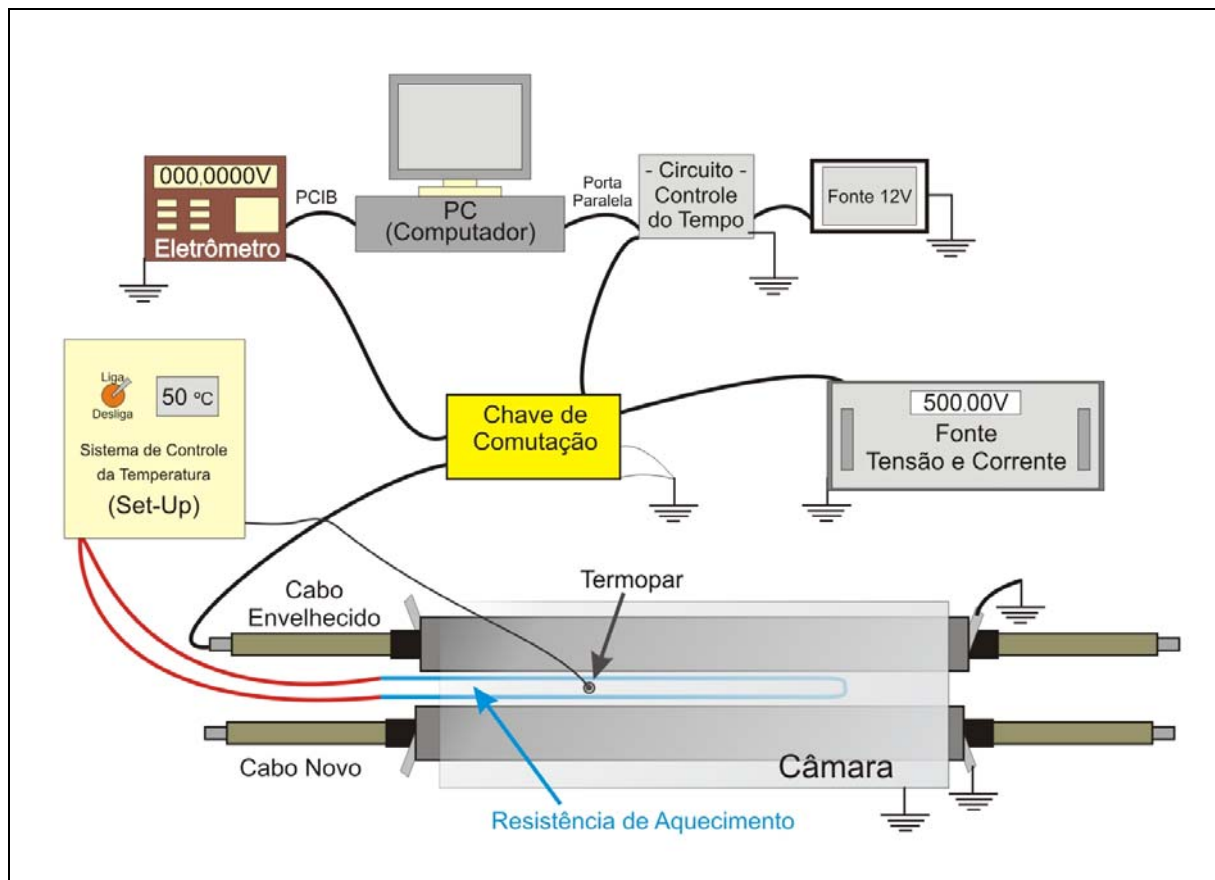


Figura 9 - Representação esquemática do sistema utilizado para realização das medidas de tensão de retorno.

O sistema de medida de tensão de retorno desenvolvido é constituído por equipamentos comerciais e por equipamentos desenvolvidos especificamente para este trabalho.

Os equipamentos comerciais utilizados foram:

- Fonte DC HEWLETT PACKARD, modelo 6521A, 0-1000 V DC / 0-200 mA;
- Eletrômetro KEITHLEY, modelo 617;
- Computador Pentium 100 MHz;

Os equipamentos desenvolvidos para montagem do sistema foram:

- Câmara de teste ^[42];
- Sistema para controle da temperatura;
- Sistema de chaveamento;
- Circuito de controle para comutação da chave;

* Também foi desenvolvido um software de controle do circuito;

Os detalhes dos equipamentos desenvolvidos estão apresentados a seguir.

3.1.1 Câmara de Teste

Para realizar o aquecimento das amostras de cabos, foi construída uma câmara com uma resistência de aquecimento de 2600 W (220 V) em seu interior. A câmara foi projetada para trabalhar com um par de cabos por vez, conforme pode ser visto na Figura 10.

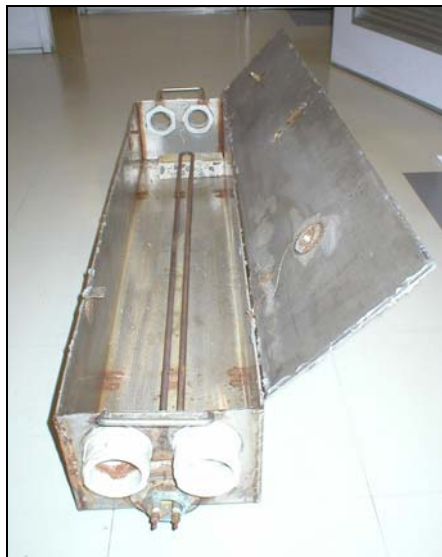


Figura 10 – Câmara de teste com controle da temperatura interna.

Depois de inseridas as amostras de cabo e fechada a câmara, a tampa superior foi vedada com silicone de forma a evitar perda de calor por convecção.

3.1.2 Sistema para Controle da Temperatura

O controle de temperatura da câmara foi realizado por um painel de comando constituído por um controlador (Carlo Gavazzi PDI40, 220V), que monitora a temperatura dentro da câmara por intermédio de um termopar e a compara com a temperatura programada, acionando ou não a resistência de aquecimento para elevar a temperatura no interior da câmara até a temperatura programada. O equipamento está mostrado na Figura 11.

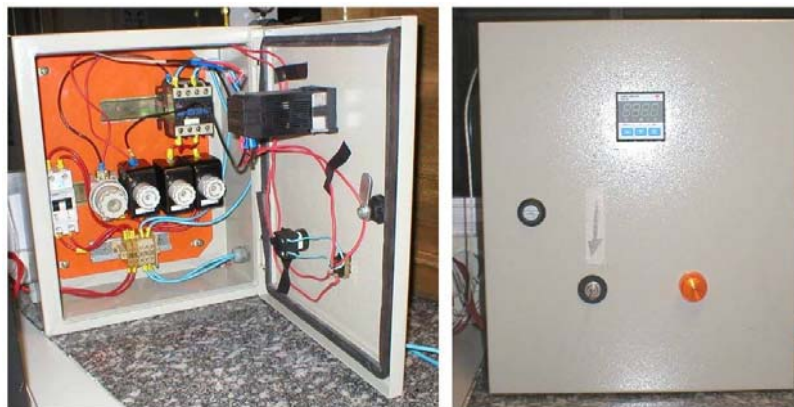


Figura 11 – Sistema de controle da temperatura.

3.1.3 Sistema de Comutação das Etapas da Tensão de Retorno

O ponto crítico no desenvolvimento de um sistema de medida de tensão de retorno é a chave de comutação das etapas. Isto se deve à elevada impedância de entrada que a chave deve possuir. Na Figura 12 é mostrada uma foto da chave desenvolvida, e na Figura 13 é mostrado um esboço de sua configuração interna, onde a numeração da posição dos contatos representa as etapas para realização de uma medida de tensão de retorno, 1 – carga, 2 curto-circuito, 3 medida.

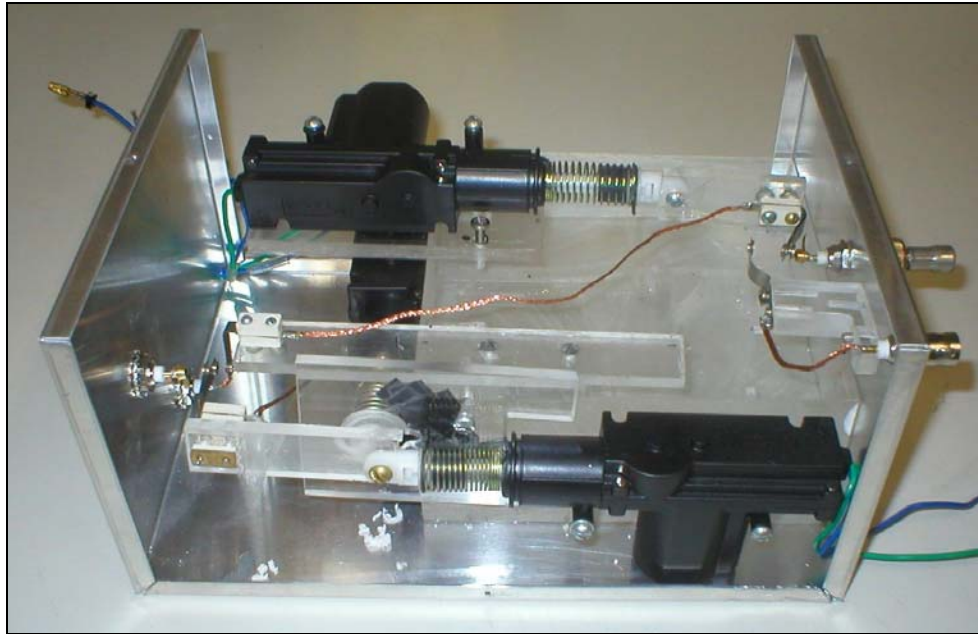


Figura 12 - Chave eletromecânica de alta impedância.

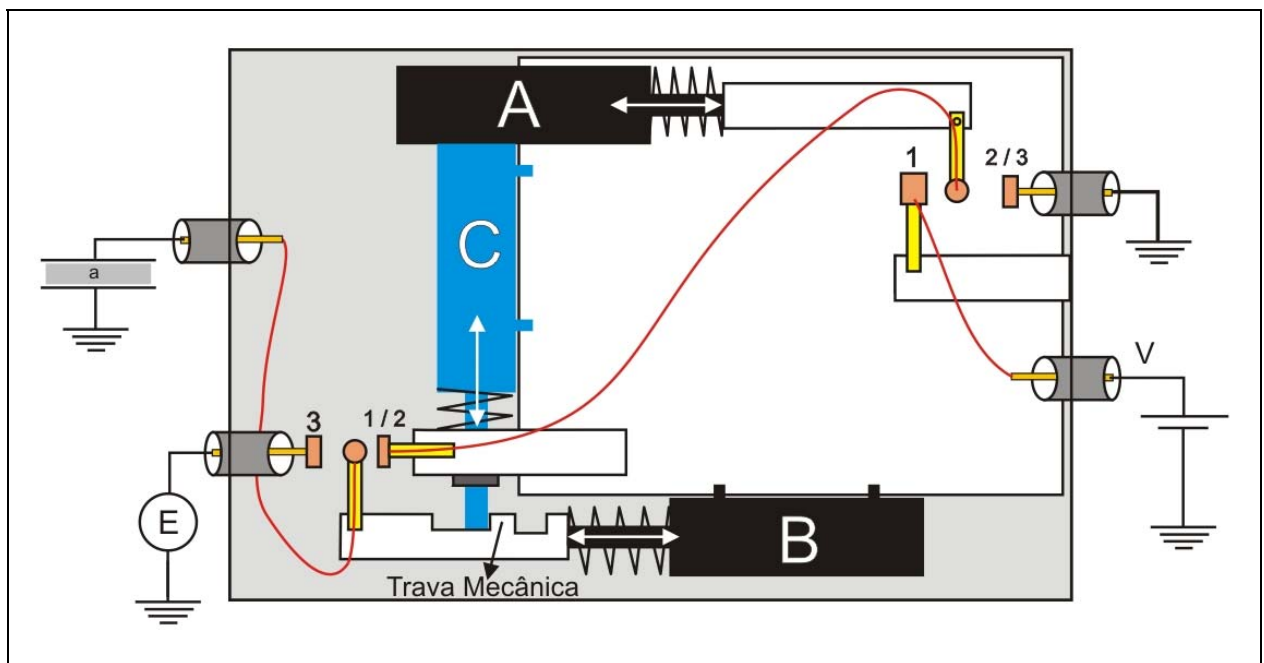


Figura 13 – Esboço da configuração interna da chave. Com os contatos na posição 1 ocorre a carga, na posição 2 ocorre o curto-circuito, e na posição 3 ocorre o processo de medida.

No sistema de chaveamento desenvolvido, o controle das etapas de medida foi realizado por meio de atuadores magnéticos (A, B, C), que são controlados eletronicamente e, dessa forma, possibilitam um melhor controle dos tempos de carga e curto circuito.

Dentro de um atuador magnético, um motor causa o recuo de um eixo móvel. Uma mola conectada à este eixo, força o avanço do mesmo. Assim, com os contatos fixados na extremidade deste eixo, foi possível realizar mecanicamente a comutação das etapas por meio do acionamento dos motores dos atuadores.

Para a chave ter alta impedância de entrada, os contatos elétricos devem permanecer isolados. Assim, foi dada atenção especial aos suportes destes contatos, os quais foram construídos em acrílico por este material apresentar elevada impedância, a qual foi verificada experimentalmente ser da ordem de $10^{13} \Omega$. Também foram tomados cuidados no manuseio durante a instalação destes suportes, e dos conectores coaxiais, para evitar a contaminação das superfícies, já que poeira ou gorduras das mãos poderiam reduzir impedância do sistema.

Testes preliminares mostraram que os atuadores magnéticos acionados durante a etapa de medida alteravam os valores de tensão medidos pelo eletrômetro. Desta forma, optou-se em adotar a configuração onde os atuadores magnéticos permaneceriam desligados durante o processo de medida. Todavia, esta configuração traz uma dificuldade, já que em caso de queda de energia poderia ocorrer uma sobrecarga no eletrômetro devido ao sistema passar direto da configuração de carga (posição 1) para a configuração de medida (posição 3), com conseqüente queima do equipamento. Esta dificuldade foi resolvida pela utilização de um terceiro atuador magnético C, que tem como função travar mecanicamente o atuador magnético B, responsável por conectar a amostra ao eletrômetro.

O funcionamento dos atuadores, A e B, possibilita o movimento dos conectores. Assim, o processo de carga ocorre quando ambos os atuadores magnéticos estão acionados (posição 1). Ao desligar o atuador magnético A, inicia-se o processo de curto-circuito (posição 2). Na situação onde ambos os atuadores magnéticos permanecem desligados (posição 3) o cabo é conectado ao eletrômetro, dando início ao processo de medida de tensão de retorno.

Os atuadores magnéticos são acionados com aplicação de uma tensão de 12 V (DC) / 1 A. Assim, foi desenvolvido um circuito eletrônico (controlado via porta paralela do computador) para realizar o acionamento destes comutadores.

3.1.4 Circuito de Controle da Chave de Comutação

Em paralelo com o desenvolvimento da chave, foi projetado e desenvolvido um circuito eletrônico, controlado via porta paralela do microcomputador, para realizar a alimentação dos comutadores e, conseqüentemente, o controle das etapas das medidas de tensão de retorno.

O circuito, conforme diagrama mostrado na Figura 14, consiste de três circuitos distintos, onde cada um deles é individualmente acionado por meio de sinal (0 ou 5 V) da porta paralela do computador.

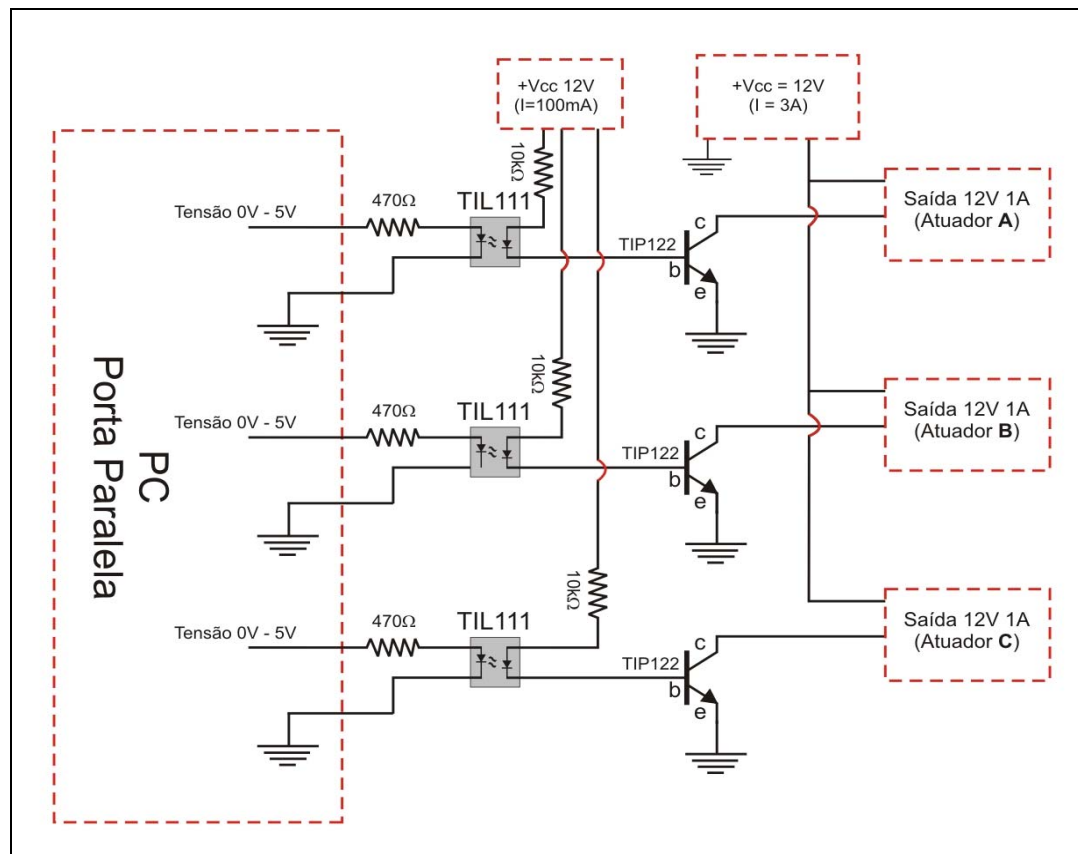


Figura 14 – Representação esquemática do circuito eletrônico para controle automatizado da chave.

As principais funções dos foto-acopladores TIL111 são: proteger a porta paralela de eventuais sobrecargas geradas pelo circuito e, por meio da fonte de 12 V, fornecer corrente de base que dá início ao processo de condução dos transistores.

Alimentados por uma fonte de 12 V e 1 A, os transistores TIP122 tem a função de prover as solicitações de corrente e tensão dos atuadores magnéticos da chave de comutação, conforme sinal dos foto-acopladores.

Os resistores do circuito têm a função de limitar as tensões e correntes sobre os dispositivos.

3.1.5 Computador e Programas

Utilizando a linguagem de programação C++, foi desenvolvido um programa para realizar o controle do circuito eletrônico descrito anteriormente. O programa consiste basicamente em fornecer em intervalos de tempo (determinados na janela do programa), valores de tensão (0 ou 5 V) pela da porta paralela do computador. A tela de controle do programa é apresentada na Figura 15. Conectado à porta paralela, o circuito eletrônico desenvolvido controla os atuadores magnéticos da chave de comutação.

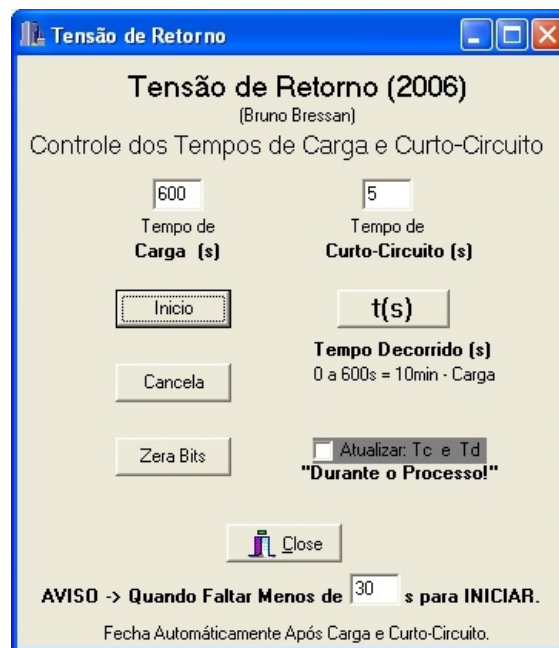


Figura 15 - Janela do programa de controle do circuito.

O programa permite a definição de tempos de carga e de descarga, em segundos, bastando digitá-los nos respectivos campos. Um sinal visual (mudança na cor da tela para vermelho) e outro sonoro (*beep*) avisam, conforme o tempo especificado, que se aproxima a etapa de descarga e de medida. Clicando em *Inicio* o programa realiza todo o procedimento de carga e descarga conforme os tempos especificados. Caso tenha-se iniciado o processo com determinados valores, pode-se alterá-los sem interromper o processo, bastando para isto, digitar os novos valores e seleccionar o item *Atualizar: tc e td*.

Todas as análises dos arquivos “*.dat*” obtidos das medidas de tensão de retorno foram feitas utilizando o Software *Origin® 5.0*. A identificação dos máximos valores das tensões de retorno e respectivos tempos de ocorrência destes máximos foi realizada com o software *Microsoft Excel*.

Para aquisição e armazenamento de dados foi utilizado um microcomputador, o qual por meio de uma placa GPIB recebe e armazena os dados medidos pelo eletrômetro, sendo o controle deste equipamento realizado através do software *Programable Electrometer – Versão GAMA*.

3.2 Descrição e Preparo das Amostras

Para a realização das medidas de tensão de retorno foram utilizados três pares de amostras, de cabos isolados em XLPE, sendo cada par constituído de um cabo novo e um cabo envelhecido em campo. Tanto as amostras do cabo novo quanto as amostras do cabo envelhecido foram obtidas do almoxarifado do LACTEC, sendo que o cabo envelhecido foi retirado da rede subterrânea de Curitiba após 30 anos em operação. A Tabela 2 apresenta as características dos cabos isolados utilizados, bem como o código de cada uma das amostras.

Tabela 2 – Descrição das amostras de cabos novo e envelhecido, utilizadas nos testes de tensão de retorno.

Descrição	Amostras	Código da Amostra
Cabo Novo <ul style="list-style-type: none"> Fabricante: GENERAL CABLE classe de tensão: 12/20 kV isolação: XLPE data de fabricação: 2002 	Amostra 1 Novo	A1.N
	Amostra 2 Novo	A2.N
	Amostra 3 Novo	A3.N
Cabo Envelhecido <ul style="list-style-type: none"> Fabricante: SUMITOMO ELECTIC INDUSTRIES classe de tensão: 12/20 kV isolação: XLPE data de fabricação: 1971 	Amostra 1 Envelhecido	A1.E
	Amostra 2 Envelhecido	A2.E
	Amostra 3 Envelhecido	A3.E

A representação gráfica é normalmente acrescida do respectivo número do teste (01, 02 ou 03), e eventualmente das temperaturas que foram realizadas os testes (20, 50 ou 80 °C). Assim, por exemplo, o terceiro (3) teste da amostra um (A1) de cabo envelhecido (E) realizado á temperatura de 50 °C, (50) será representado nos gráficos por: A1.E.03.50.

O preparo das pontas das amostras é necessário para se realizar com segurança o acesso ao condutor e à blindagem, além de também conferir igualdade entre as amostras. Para a realização das medidas de tensão de retorno as pontas dos cabos foram preparadas de acordo com a Figura 16.

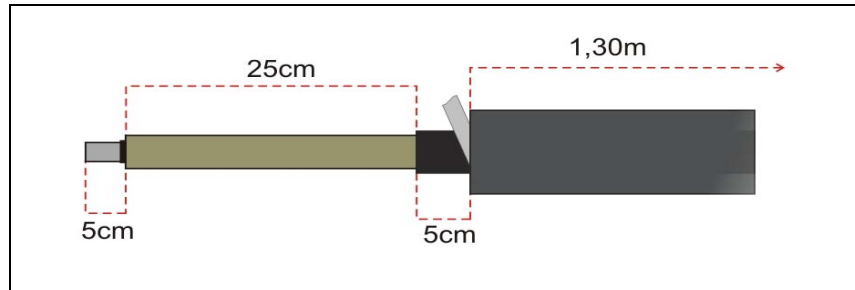


Figura 16 – Detalhamento da preparação das pontas dos cabos isolados.

3.3 Parâmetros e Procedimentos Adotados para as Medidas de Tensão de Retorno

Dada a sensibilidade do processo de medida de tensão de retorno, em todos os testes foram realizados alguns procedimentos com a intenção de controlar o maior número possível das variáveis envolvidas durante o processo de medida. A seguir são descritas as características dos parâmetros e dos procedimentos adotados para realização dos testes de tensão de retorno.

Temperaturas Adotadas:

- As medidas de tensão de retorno foram realizadas em três diferentes temperaturas: 20 °C, 50 °C e 80 °C.

Tensão Aplicada (U_0):

- Para as medidas de tensão de retorno, os cabos foram submetidos sempre à tensão de carga $U_0 = 500$ V.

Tempo de Carga (t_c) _ Polarização

- Visando um melhor aproveitamento do tempo de realização das medidas, foi determinado experimentalmente, (ver item 3.1.4 deste trabalho) o tempo necessário para ocorrer uma

completa polarização do material dielétrico, responsável pela formação da tensão de retorno.

Tempo de Descarga (t_d) _ Curto-circuito:

- Foi adotado o tempo de 5s como tempo de descarga (curto-circuito).

Tempo de Aterramento _ Despolarização

- Com a intenção de possibilitar uma completa despolarização elétrica do material dielétrico dos cabos, estes permaneceram curto-circuitados por pelo menos 24 h antes do início de cada processo de medida.
- Cada amostra foi submetida à três medidas de tensão de retorno realizadas em sequência. Dessa forma, a segunda e a terceira medidas poderiam sofrer alguma influência da(s) medida(s) realizada(s) anteriormente. Baseado em alguns testes preliminares, foi adotado o um intervalo de 20 minutos entre medidas realizadas no mesmo cabo.

Aquecimento da Chave de Comutação

- Foi verificado que após alguns minutos em funcionamento, os comutadores apresentavam um pequeno aquecimento. Assim, para manter iguais condições em todas as medidas, antes do início das medidas a chave permanecia acionada durante 30 minutos para que houvesse um aquecimento completo.

Aquecimento das Amostras de Cabo

- Monitorando a temperatura dos cabos em diferentes pontos durante o processo de aquecimento, verificou-se que três horas de aquecimento são suficientes para que a temperatura medida nestes pontos se estabilize. Dessa forma, foi adotado o intervalo de três horas para realizar o completo aquecimento das amostras de cabo.

Umidade Relativa

- A umidade relativa, do ambiente, foi constantemente monitorada, permanecendo em aproximadamente 60% durante a realização das medidas de tensão de retorno.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação das Características do Sistema de Medida

Para assegurar um correto funcionamento do sistema de medida de tensão de retorno desenvolvido, foram avaliadas algumas características que, em testes preliminares, observou-se a necessidade de serem estimados seus valores.

- Devido à alta impedância necessária para realizar medidas de tensão de retorno, foi dada uma atenção especial à determinação da impedância do sistema desenvolvido, sendo realizado uma verificação experimental da mesma.
- Também houve uma preocupação com possíveis fontes de indução, uma vez que a alta impedância do sistema contribui para um acúmulo de cargas por meio de indução. Esta indução poderia ter origem externa, indução eletromagnética, ou até mesmo ser proveniente do ponto de conexão da fonte ou da presença dos atuadores magnéticos utilizados na chave de comutação.
- Visando um melhor aproveitamento do tempo de realização das medidas, foi determinado experimentalmente o tempo de carga necessário para ocorrer a estabilização dos valores máximos das curvas de tensão de retorno obtidos das amostras utilizadas.

4.1.1 Determinação da Impedância do Sistema de Medida

Diversas impedâncias parasitas podem estar presentes no sistema de medida, entre as quais estão as impedâncias parasitas provenientes das conexões da chave, dos conectores, dos fios utilizados nas conexões e, ainda, devido à presença de sujeira na superfície dos materiais isolantes.

A Figura 17 exibe um diagrama das impedâncias envolvidas no processo de medida de tensão de retorno, onde o cabo com impedância R_c atua como fonte geradora de tensão eletromotriz (\mathcal{E}), sendo R_c a impedância do eletrômetro e R_{pn} as possíveis impedâncias parasitas.

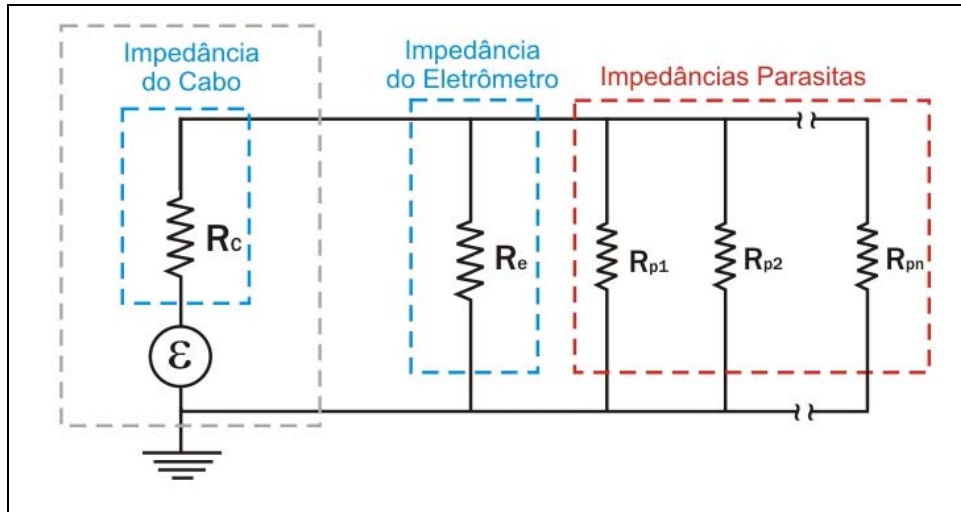


Figura 17 – Diagrama das impedâncias envolvidas em uma medida de tensão de retorno

Caso existam, estas impedâncias parasitas reduzem o valor da impedância do sistema, e se esta redução for significativa ocorrerão alterações nos valores dos parâmetros obtidos das curvas de tensão de retorno. Logo, é fundamental determinar a impedância do sistema para assegurar a validade dos resultados.

A seguir é descrito o procedimento experimental realizado para determinar a impedância do sistema de medida de tensão de retorno:

Utilizando um capacitor de capacitância, (C) conhecida, conectado ao sistema de medida de tensão de retorno, tem-se a configuração de um circuito RC, onde R representa a impedância (R_m) do sistema de medida. O comportamento da tensão (V_f) sobre um circuito RC obedece a um decaimento exponencial, dado pela seguinte expressão:

$$V_f = V_i e^{\frac{-t}{RC}} \quad (6)$$

onde t, é o tempo decorrido após a retirada da tensão (V_i) aplicada.

Assim, isolando o valor R na equação (6), e conhecendo os valores da tensão inicialmente aplicada, V_i , pode-se obter um gráfico da tensão de descarga (V_f) em função do tempo decorrido após início do processo de descarga.

$$R_m = \frac{-t_f}{\ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)C} \quad (7)$$

Com valores conhecidos da tensão V_i aplicada, e da capacitância C do capacitor, pode-se obter, a partir do gráfico da tensão de descarga, valores de V_f em função de valores de t_f , e assim, a partir da equação 7, pode-se determinar a impedância R_m do sistema de medida de tensão de retorno.

Assim, foi aplicada uma tensão de 200 V, sobre um capacitor (de 1 Nf) conectado ao sistema de medida, e após retirar a tensão aplicada, foi obtida a curva de tensão de descarga em função do tempo. As três curvas de descarga obtidas estão apresentadas no gráfico da Figura 18.

Para realizar o cálculo do valor da impedância do sistema de medida, a partir da equação 7, foram escolhidos dois conjuntos de valores, tensão (V_f) em função do tempo (t_f), de cada curva de descarga. Estes valores estão apresentados na Tabela 3, bem como os respectivos valores calculados para a impedância do sistema.

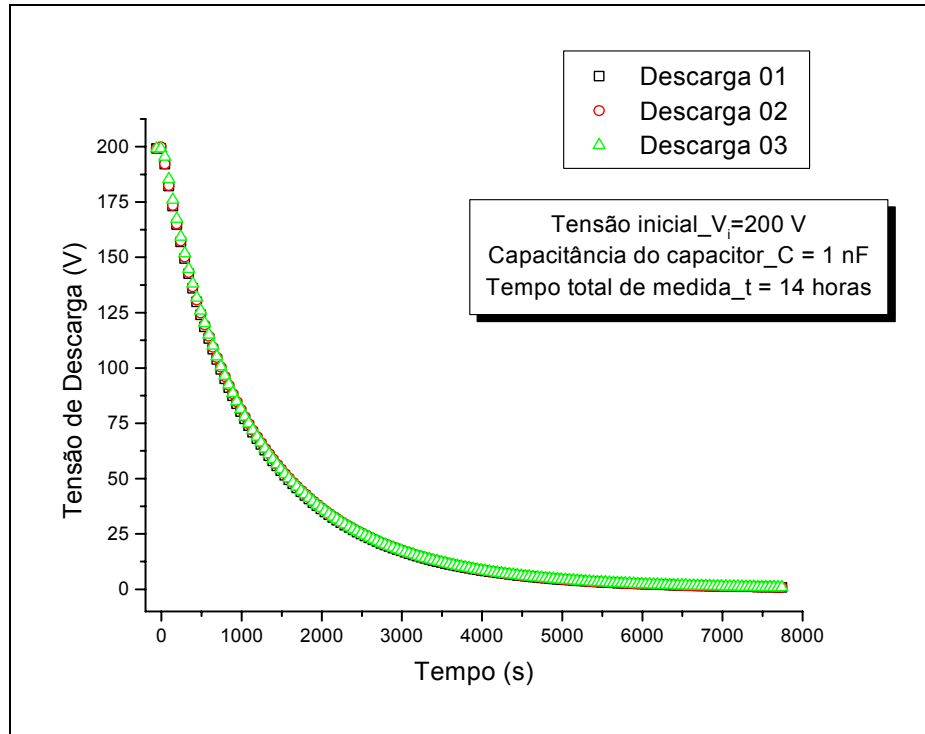


Figura 18 – Curvas de descarga obtidas para determinação da impedância do sistema.

Tabela 3 – Valores retirados das curvas de descarga utilizados para obter o valor aproximado da impedância do sistema.

Curvas	Dados	t_f (s)	V_f (V)	R_m (Ω)
Descarga 01		1000	79,849	$1,10 \times 10^{12}$
Descarga 02		1000	80,672	$1,11, \times 10^{12}$
Descarga 03		1000	80,706	$1,11, \times 10^{12}$
Descarga 01		3000	17,1218	$1,22, \times 10^{12}$
Descarga 02		3000	17,5908	$1,24, \times 10^{12}$
Descarga 03		3000	17,3223	$1,23, \times 10^{12}$
MÉDIA				$1,17, \times 10^{12}$

O valor médio das impedâncias, bem como todos os valores de impedância calculados, são superiores à $1,0 \times 10^{12} \Omega$. Dessa forma, foi confirmado que o sistema possui uma impedância elevada ^[38], de forma que é possível a realização de medidas de tensão de retorno confiáveis.

4.1.2 Avaliação da Indução do Sistema

Para avaliar se o sistema sofre, ou gera, induções durante a realização das medidas, foram utilizados cabos submetidos a um longo período de aterramento, ao menos 24 h, de forma que se possa considerar que estes cabos se encontram totalmente despolarizados.

O método, denominado “zero-test”^[27], consiste em realizar medidas de tensão de retorno com tensão de carga nula. Nesta condição, a tensão de retorno deve ser nula, e assim, qualquer tensão medida deve ser associada a algum tipo de indução. No gráfico da Figura 19 são mostradas curvas obtidas a partir destes testes para duas das amostras de cabo.

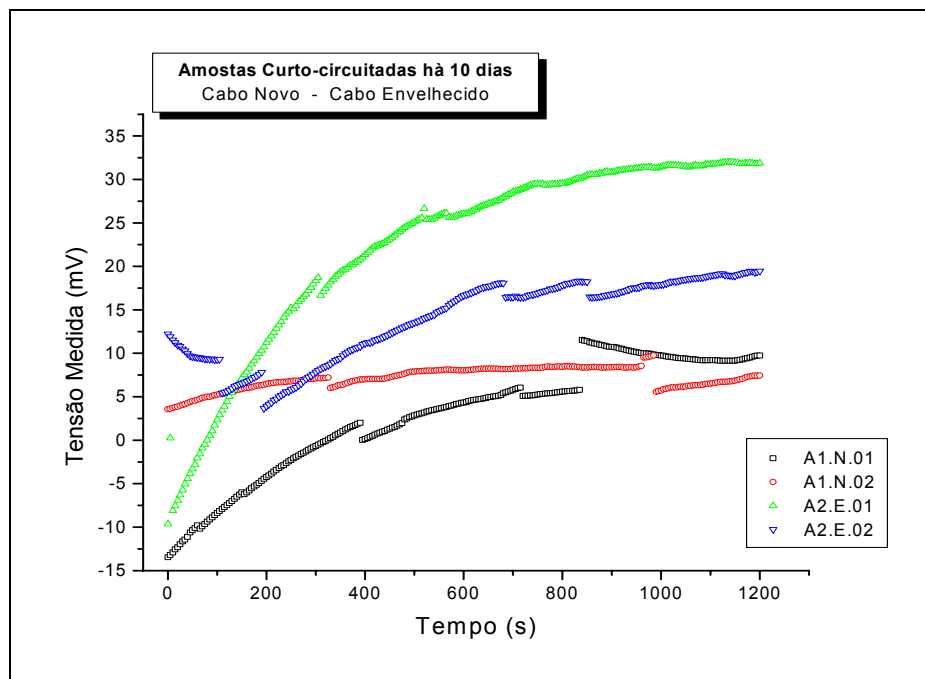


Figura 19 - Curvas de tensão, obtidas por meio do "zero test".

Verifica-se que em todas as curvas da Figura 19, obtidas por meio do teste de indução, os valores de tensão são inferiores à 35 mV, que é um valor pequeno quando comparado aos valores de tensão de retorno, da ordem de alguns volts, obtidos nos testes realizado nas amostras de cabo.

Em função dos baixos valores de tensão medidos, pode-se considerar que as descontinuidades apresentadas nas curvas ocorrem devido às induções externas, tais como ondas eletromagnéticas, ou devido à interferência causada por diferentes equipamentos conectados na rede elétrica.

A princípio, parece que podemos considerar que as induções medidas pelo sistema são muito pequenas, e não devem interferir significativamente nas medidas de tensão de retorno.

4.1.3 Determinação do Tempo de Carga

A polarização do material dielétrico de um cabo energizado ocorre devido ao campo elétrico gerado entre o condutor e a blindagem, devido à diferença de potencial entre estes. Assim, pode ocorrer que o período de carga, em caso de escolha aleatória, não seja suficiente para causar a polarização efetiva dos mecanismos responsáveis pela formação da tensão de retorno. Pode também ocorrer a situação inversa, onde o tempo de carga escolhido ultrapasse o tempo necessário à polarização do material, aumentando desnecessariamente o intervalo para realização das medidas. Assim, o tempo de carga ideal deve ser suficiente para polarizar os mecanismos relevantes à geração da tensão de retorno.

A determinação do tempo de carga ideal foi realizada por meio de medidas de tensão de retorno com diferentes tempos de carga. A construção de um gráfico dos valores máximos de tensão de retorno (U_m) em função do tempo de carga (t_c) permite identificar o tempo de carga ideal, isto é o tempo de carga para o qual o valor de U_m é estabilizado. Assim, foram realizados testes em três amostras novas e envelhecidas em campo, com tensão de carga de 500 V, à temperatura de 20 °C, sendo realizados testes com tempos de carga entre 1 a 30 minutos. Os valores máximos das curvas de tensão de retorno obtidas estão apresentadas na Figura 20 para o cabo novo e na Figura 21 para o cabo envelhecido.

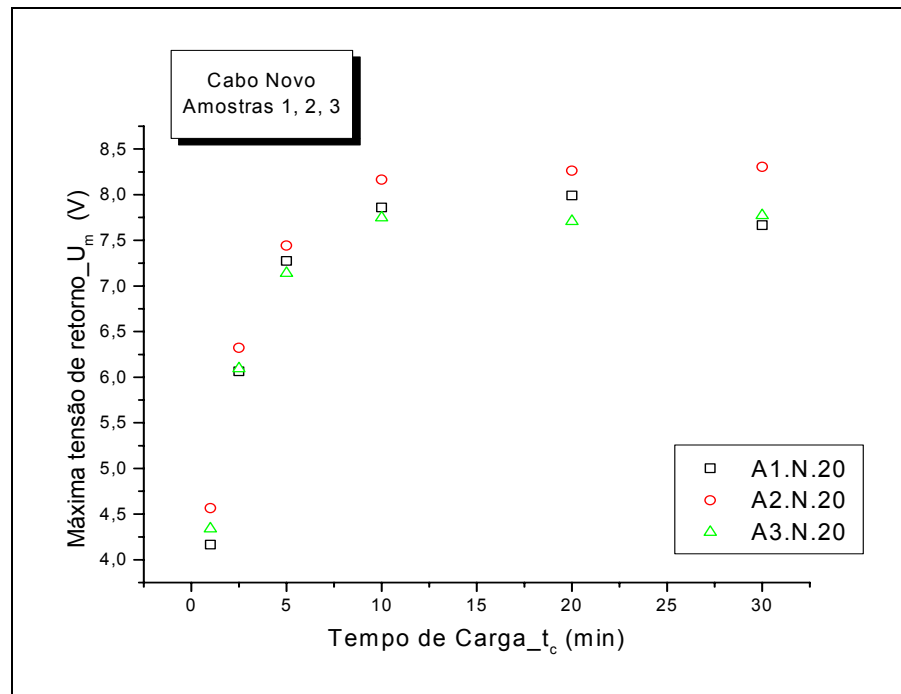


Figura 20 - Máximos valores de tensão de retorno em função de diferentes tempos de carga, obtidos da amostra de cabo novo.

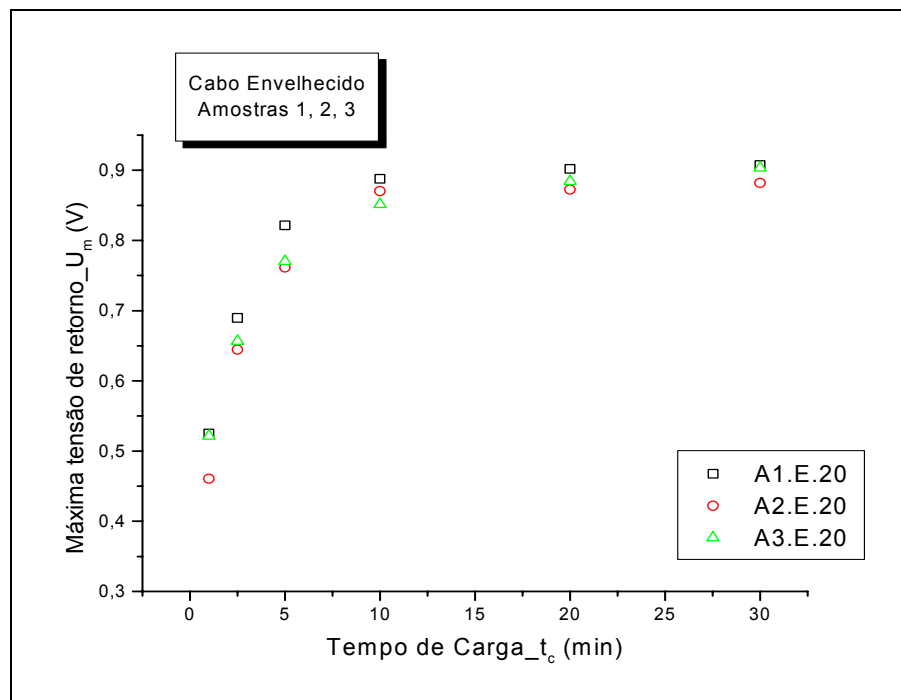


Figura 21 - Máximos valores de tensão de retorno em função de diferentes tempos de carga, obtido da amostra de cabo envelhecido.

Apesar da diferença nos valores máximos de tensão de retorno obtidos para o cabo novo e para o cabo envelhecido, é observada que em ambos os casos existe uma forte tendência de estabilização destes valores máximos após tempo de carga de 10 minutos. Assim, foi assumido que o tempo de 10 minutos é suficiente para polarizar os mecanismos responsáveis pela formação da tensão de retorno nas amostras de cabo utilizadas.

Com base nestes resultados, foi adotado o tempo de carga de 10 minutos nas medidas de tensão de retorno realizadas.

4.2 Medidas de Tensão de Retorno em Função da Temperatura

A fim de avaliar a influência da temperatura as medidas de tensão de retorno foram realizadas em três pares de amostras, sendo cada par composto de uma amostra nova e outra envelhecida em campo.

O processo de medida realizado em cada amostra de cabo, constitui em obter três curvas de tensão de retorno, sendo que este mesmo processo foi repetido, em dias diferentes, com a amostra sob as temperaturas de 50 °C e 80 °C. Em todas as amostras, os testes foram realizados primeiramente à menor temperatura, 20 °C no primeiro dia, 50 °C no segundo dia e à temperatura de 80 °C no terceiro dia.

As curvas de tensão de retorno obtidas para cada uma das amostras de cabo, sob as temperaturas de 20 °C, 50 °C e 80 °C, estão apresentadas nos gráficos da Figura 22.

A fim de ilustrar o comportamento da tensão de retorno entre as diferentes amostras de cabo, estão apresentados na Figura 23 para as amostras de cabo novo e na Figura 24 para as amostras de cabo envelhecidas, um gráfico contendo apenas a primeira das três curvas obtidas para cada amostra.

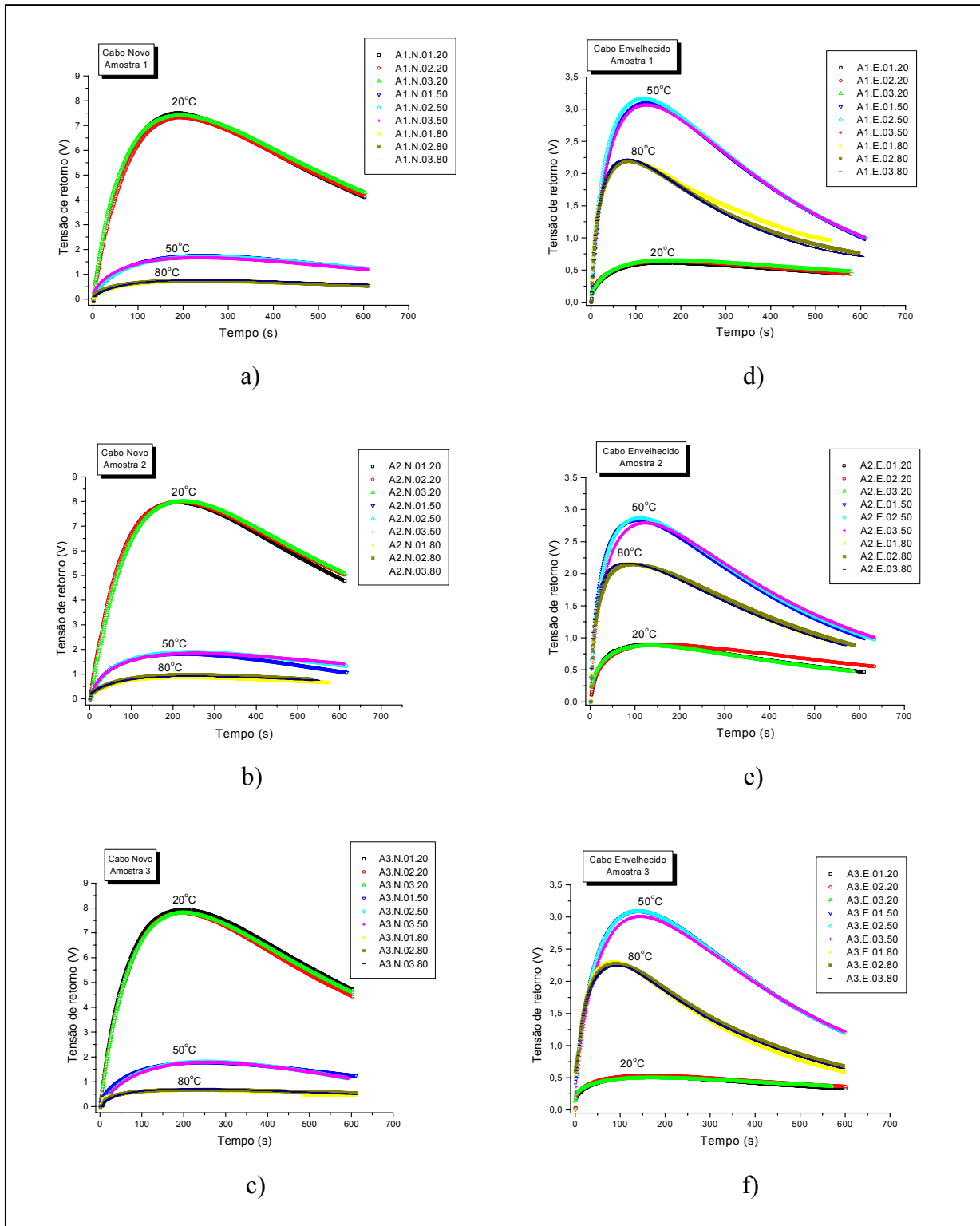


Figura 22 – Gráficos das curvas de tensão de retorno obtidas em função da temperatura. Amostras novas 1, 2 e 3; a), b) e c) respectivamente, amostras envelhecidas 1, 2 e 3; d), e) e f) respectivamente.

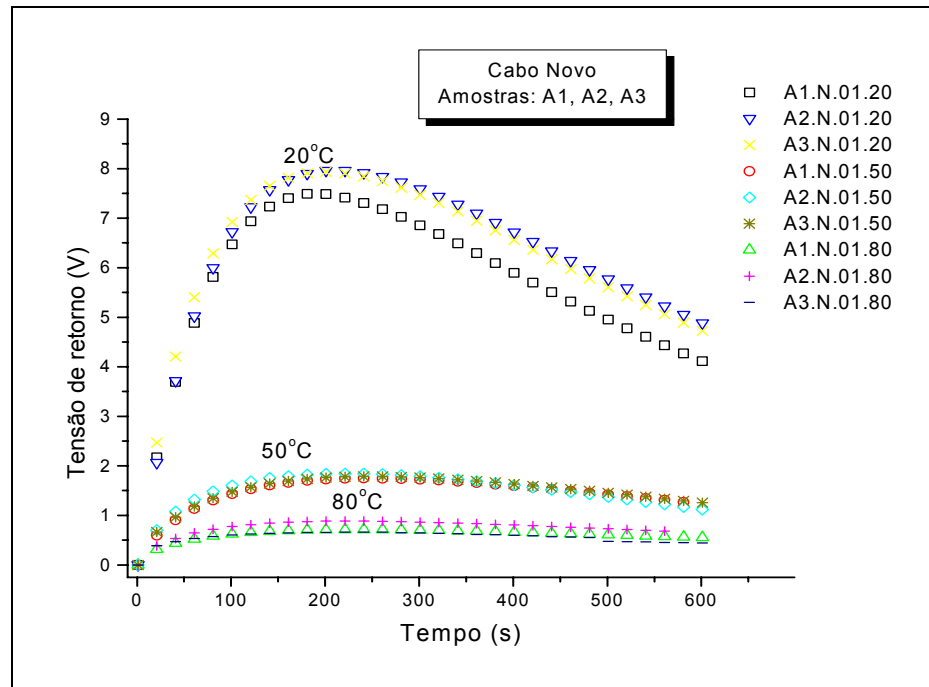


Figura 23 – Comparação entre curvas de tensão de retorno obtidas para as três amostras de cabo novo.

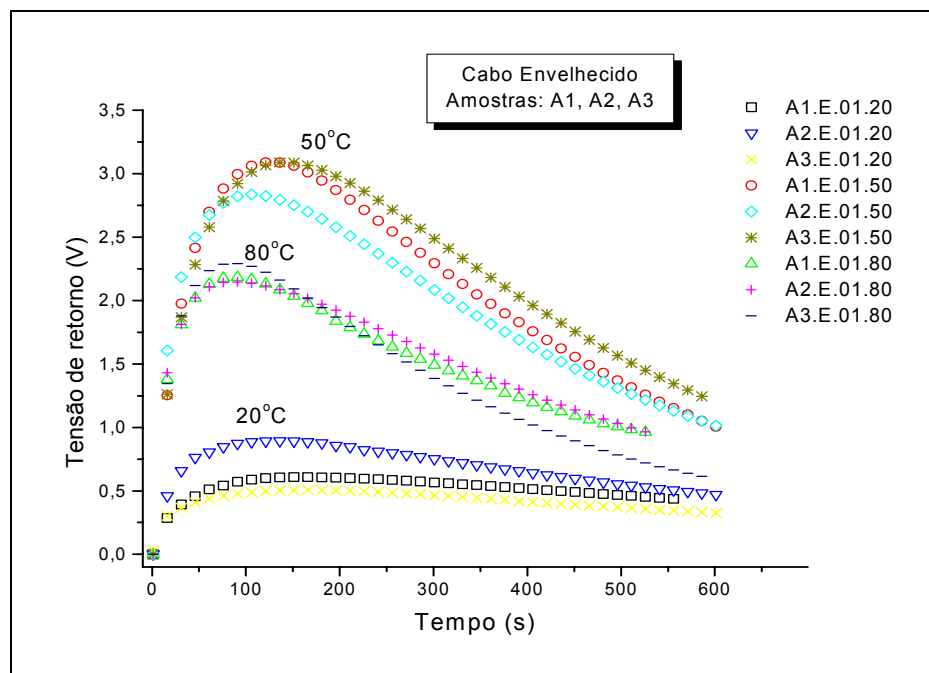


Figura 24 – Comparação entre curvas de tensão de retorno obtidas para as três amostras de cabo envelhecido em campo.

Uma primeira comparação entre as curvas obtidas, para as amostras novas e envelhecidas, mostra que à temperatura de 20 °C, o cabo novo apresenta valores máximos aproximadamente dez vezes maior que os máximos das curvas de tensão de retorno obtidas para o cabo envelhecido, sendo observado também, um diferente comportamento destes valores máximos em função da temperatura.

Lembramos aqui, que as amostras, novas e envelhecidas, dos cabo isolados em XLPE além de terem diferentes procedências, provavelmente possuem diferenças em suas composições dado as diferentes épocas em que foram fabricadas ^[27]. Assim, vale ressaltar que o objetivo destas medidas é avaliar o comportamento da tensão de retorno em função da temperatura.

O comportamento dos valores máximos das curvas de tensão de retorno em função da temperatura pode ser mais facilmente observado no gráfico da Figura 25, onde se vê que para o cabo novo ocorre uma redução no valor máximo da tensão de retorno em função do aumento da temperatura, conforme indicado pela linha contínua. Já para o cabo envelhecido, ocorre um aumento deste valor, de 20 °C para 50 °C, com posterior redução em 80 °C, indicado pela linha pontilhada.

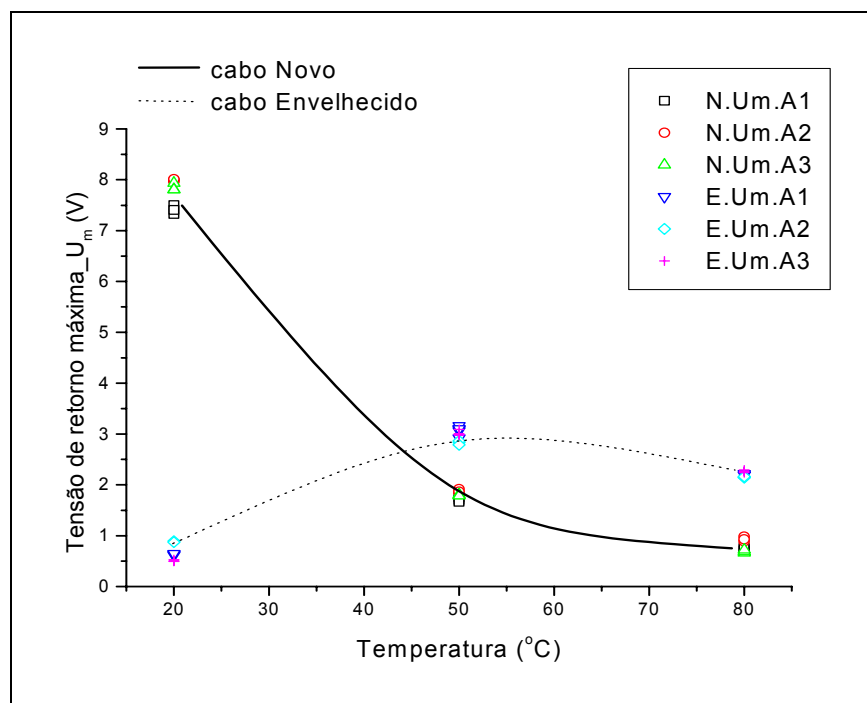


Figura 25- Gráfico dos valores das tensões de retorno máxima (U_m), em função da temperatura.

Sugere-se que o comportamento da máxima tensão de retorno em função da temperatura observado para as amostras de cabo envelhecido pode estar relacionado com a presença de arborescências em água no material dielétrico isolante ². Já para as amostras de cabo novo, pode-se supor a presença, na estrutura do material dielétrico isolante, de mecanismos que sejam termicamente ativados, causando a redução do valor da tensão de retorno.

Também pode ser observado entre as curvas de tensão de retorno da Figura 23 e da Figura 24 (ou, mais facilmente observado na Figura 26) entre as amostras novas e envelhecidas, um diferente comportamento do tempo para ocorrência dos valores máximos da tensão de retorno.

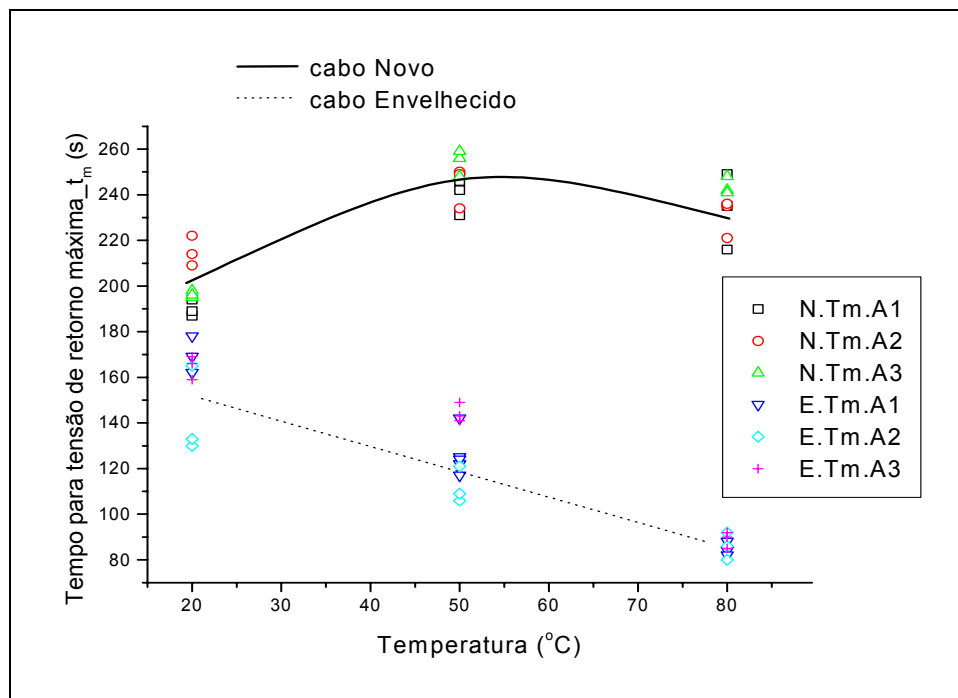


Figura 26 - Gráfico dos tempos para ocorrer os máximos de tensão de retorno (t_m), em função da temperatura.

² No item 5.3 deste trabalho estão mostradas as micrografias que comprovam a presença de arborescências em água nas amostras de cabos envelhecidas em campo.

Conforme indicado pela linha pontilhada, as amostras envelhecidas apresentam uma diminuição gradativa no tempo de ocorrência destes máximos em função do aumento da temperatura. Já para as amostras novas, conforme indicado pela linha contínua, ocorre um aumento deste tempo de ocorrência do máximo de 20 para 50 °C, com uma tendência de diminuição dos 50 para 80 °C,

Dada a influência da temperatura observada nos parâmetros do máximo valor da tensão de retorno, na Figura 25, e do tempo para ocorrer este máximo, na Figura 26, sugere-se que sejam realizados estudos posteriores para identificar as causas deste comportamento.

Independente das explicações físicas dos comportamentos observados nas amostras novas e envelhecidas é mostrado que a temperatura tem influência significativa nas medidas de tensão de retorno. Dessa forma, quando da realização de medidas em campo, é preciso levar em conta esta influência para que não sejam feitas interpretações errôneas dos resultados obtidos.

4.3 Determinação da Presença de Arborescências em Água nas Amostras de Cabo Envelhecido.

Como as amostras de cabos envelhecidas em campo permaneceram em operação por 30 anos, desde o início do trabalho foi suposto que a isolação destes cabos apresentava elevado grau de envelhecimento e degradação, com a provável presença de arborescências no seu interior. Assim, com o intuito de avaliar o estado de degradação das amostras de cabos envelhecidos em campo e comprovar a presença de arborescências em água, foi realizada uma análise, via microscopia ótica, da isolação destes cabos.

Doze amostras, com 5 cm de comprimento cada, foram cortadas dos cabos isolados utilizados para realização dos testes de tensão de retorno. Utilizando um micrótomo LEICA, modelo RM2165, foram retiradas destas amostras, perpendicularmente a seção transversal do

cabo, diversas fatias da isolação, com 100 μm de espessura cada. Uma das amostras de cabo preparada para análise está mostrada na Figura 27.



Figura 27 - Amostra de cabo isolado, envelhecido em campo, após condicionamento em solução de azul de metileno.

Para facilitar a visualização das arborescências, as fatias retiradas da isolação dos cabos permaneceram condicionadas durante 4 horas em uma solução aquosa com 2 g de azul de metileno, 32 ml de amônia concentrada, e 1 litro de água.

Para análise das amostras foi utilizado um microscópio NIKON, modelo SMZ 800, sendo realizada a quantificação e medição das arborescências observadas. Os equipamentos utilizados estão mostrados na Figura 28.

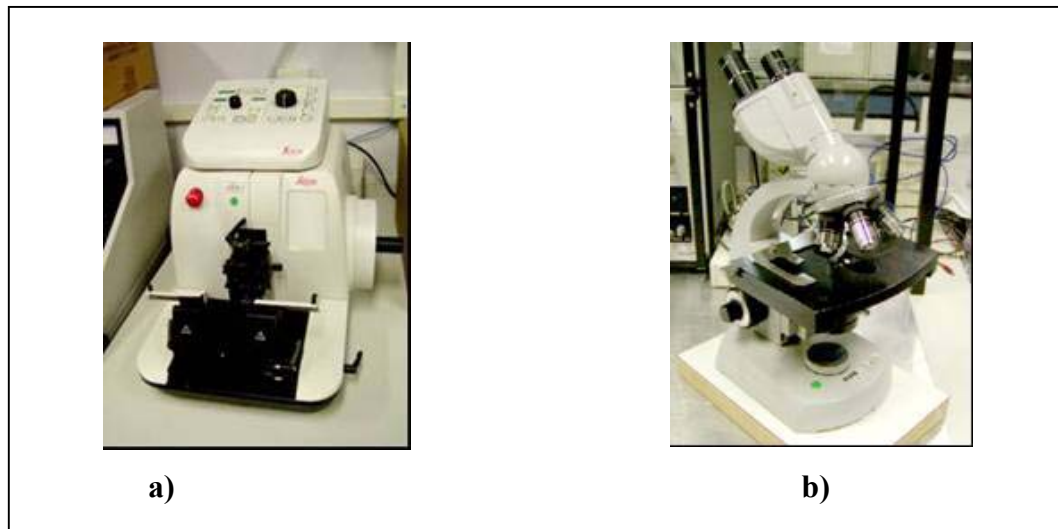


Figura 28 - a) Equipamento de corte, LEICA, b) Microscópio ótico, NIKON.

Na Figura 29 estão mostradas as principais arborescências encontrada nas amostras testadas.

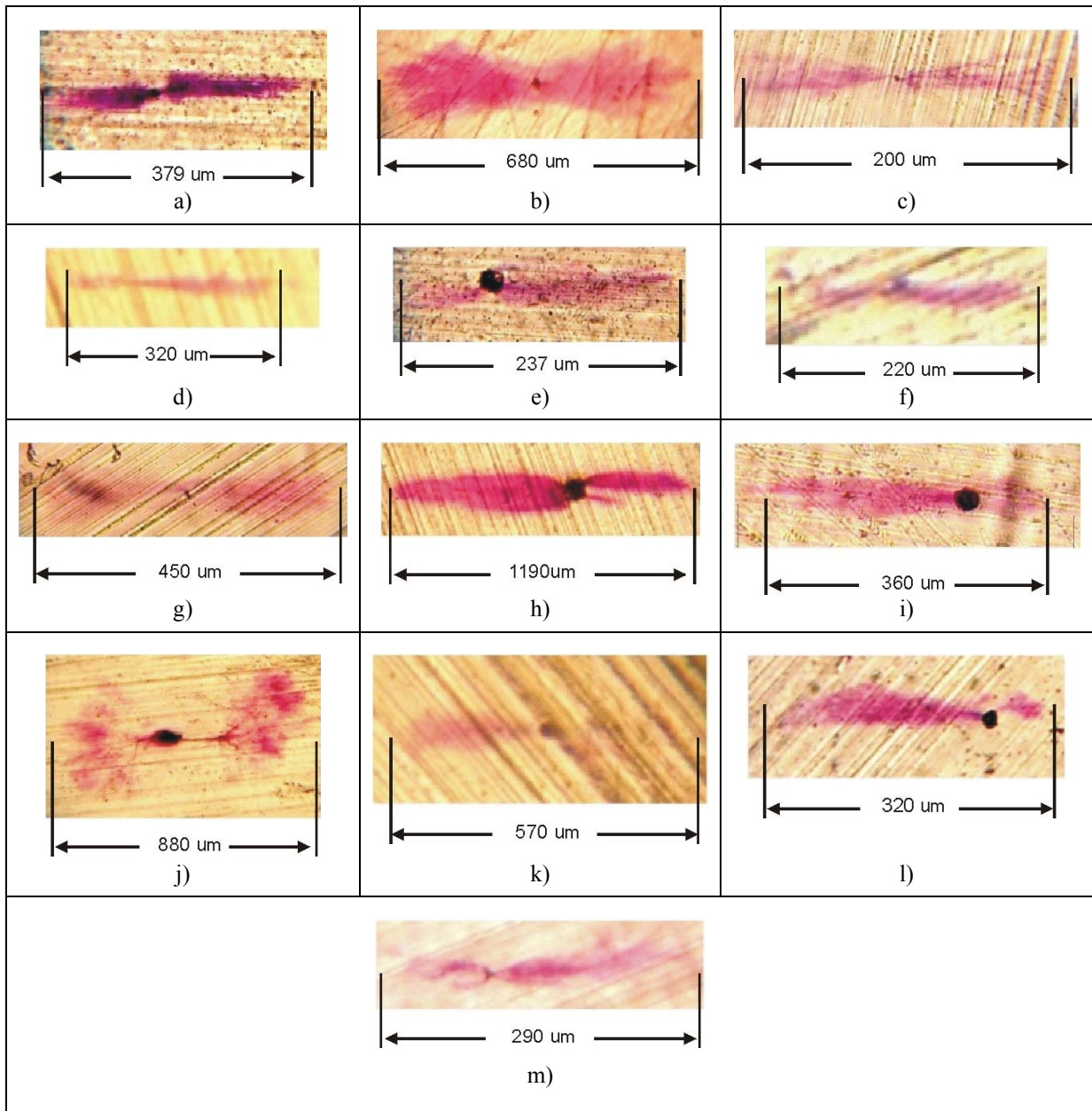


Figura 29 - Arborescências em água encontradas nos trechos dos cabos isolados envelhecidos utilizados nas medidas de tensão de retorno.

Em cada uma das fatias avaliadas foram encontradas arborescências em água. Em função da quantidade e do tamanho das diversas arborescências encontradas nas amostras, confirmou-se a suposição inicial de que as amostras envelhecidas apresentavam um grau elevado de degradação devido à existência de arborescências em água.

5 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho, que era o desenvolvimento de um sistema para medidas de tensão de retorno, foi alcançado. Para a composição deste sistema foram desenvolvidos, ao longo do trabalho, os seguintes itens:

- ✓ câmara de teste
- ✓ sistema para controle da temperatura
- ✓ sistema de chaveamento
- ✓ circuito de controle para comutação da chave
- ✓ software de controle do circuito

O sistema de medida desenvolvido preenche as principais características necessárias de um sistema de medida de tensão de retorno, os quais são: elevada impedância de entrada e baixa susceptibilidade à interferências eletromagnéticas. A impedância de entrada determinada experimentalmente é da ordem de $10^{12} \Omega$ e, a baixa susceptibilidade à interferência foi verificada por meio do “zero test”.

Foi determinado experimentalmente que o tempo de carga de 10 minutos é suficiente para a polarização das amostras de cabos utilizadas.

Também foi verificada experimentalmente a presença de arborescências em água nas amostras de cabo envelhecido.

Para validação do sistema foram realizadas medidas de tensão de retorno em cabos novos e envelhecidos em campo. Apresentando boa repetibilidade dos valores medidos, foi mostrado que, tanto para o cabo novo quanto para o cabo envelhecido em campo, a variação da temperatura no ambiente onde está sendo realizada a medida de tensão de retorno afeta de forma significativa os valores de tensão de retorno máxima e do tempo de ocorrência deste máximo. Este resultado é de grande importância para diagnóstico de cabos em campo, para que não sejam feitas interpretações errôneas dos resultados obtidos.

6 TRABALHOS FUTUROS

Visando dar continuidade ao trabalho desenvolvido, são sugeridos os seguintes temas:

1 – Aperfeiçoamento do sistema de medida de tensão de retorno com a automatização completa do sistema de medida, incluindo:

- controle da temperatura
- rotatividade de amostras
- variação da tensão de carga
- armazenamento e apresentação dos resultados

2 – Adaptação do sistema desenvolvido para a realização de testes em alta tensão.

3 – Desenvolvimento de um modelo teórico para o comportamento da tensão de retorno em cabos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- [1] PATSCH, R., JUNG, J. Improvement of the Return Voltage Method for Water Tree Detection in XLPE Cables. **International Symposium on Elect. Insulation**, p. 133-136, Anaheim, USA, April 2000.
 - [2] DENSLEY, R.J; BARTNIKAS, R.; BERNSTEIN, B. Multiple Stress Aging of Solid Dielectric Extruded Dry-cured Insulation Systems for Power Transmission Cables. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 9, n. 1, p. 559-571, Jan. 1994.
 - [3] DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J.C. **Electrical Degradation and Breakdown in Polymers**. London: Peter Peregrinus, 1992.
 - [4] CRINE, J.P. Electrical, Chemical and Mechanical Processes in Water Treeing. **IEEE TDEI**, v. 5, n. 5, p. 681-694, Oct. 1998.
 - [5] EICHHORN, R.M. **Engineering Dielectrics – Electrical Properties of Solid Insulating Materials**, v. IIA. Baltimore: ASTM STP783, 1983.
 - [6] NÉMETH, E. Measuring Voltage Response: a Non-destructive Diagnostic Test Method of HV Insulation. **IEEE Proc.-Sci. Meas.Technology**, vol. 146, n. 5, p. 249-252, 1999
 - [7] TEIXEIRA JR., M. D. R. **Cabos de Energia**. São Paulo: ArtLiber Editora, 2004.
 - [8] BARTNIKAS, R., SRIVASTAVA, K. D. **Power and Communication Cables – Theory and Applications**. New York: McGraw-Hill, 2000.
 - [9] HALL, C. **Polymer Materials**. London: Macmillan Education, 1989.
 - [10] BARLOW, A. The Chemistry of Polyethylene Insulation. **IEEE EIM**, v. 7, n. 1, p. 8-17, Jan. 1991.
 - [11] DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J.C. **Electrical Degradation and Breakdown in Polymers**. London: Peter Peregrinus, 1992.
 - [12] CYGAN, P.; LAGHARI, J.R. Models for Insulating Aging Under Electrical and Thermal Multistress. **IEEE TEI**, v. 25, n. 5, p.923-934, Oct. 1990.
 - [13] DENSLEY, R.J; BARTNIKAS, R.; BERNSTEIN, B. Multiple Stress Aging of Solid Dielectric Extruded Dry-cured Insulation Systems for Power Transmission Cables. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 9, n. 1, p. 559-571, Jan. 1994.
 - [14] GJAERDE, A. C. Multifactor Aging Models – Origin and Similarities. **IEEE EIM**, v. 13, n. 5, p. 6-13, Sept. 1997.
 - [15] MONTANARI, G.C.; SIMONI, L. Aging Phenomenology and Modeling. **IEEE TEI**, v. 28, n. 5, p. 775-776, Oct. 1993.
 - [16] PATSCH, R., JUNG, J. Water Trees in Cables: Generation and Detection. **Non-Destructive Diagnostics of insulating Systems**, vol. 146, No. 5, p. 253-259, September 1999

-
- [17] CRINE, J.P. Electrical, Chemical and Mechanical Processes in Water Treeing. **IEEE TDEI**, v. 5, n. 5, p. 681-694, Oct. 1998.
- [18] EICHHORN, R.M. **Engineering Dielectrics – Electrical Properties of Solid Insulating Materials**, v. IIA. Baltimore: ASTM STP783, 1983.
- [19] KOWALSKI, E. L., **Estudo da Borracha Natural Por Meio de Técnicas De Caracterização de Dielétricos**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Paraná, 2006.
- [20] ROBERT, R. **Descarga Interna e Tensão de Retorno em Capacitores**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 23, no. 3, Setembro, 2001.
- [21] BERLEZE, S. L. M., ROBERT, R. **Response Functions and After-effect in Dielectrics**. IEEE Transactions on Dielectrical Insulation, Vol. 10, No. 4; August 2003.
- [22] GROSS, B., ROCHA, P. **Estudos sobre Dielétricos**. An. Acad. Bras. Cien., tomo IX, n. 3, p. 187, setembro de 1937.
- [23] GROSS, B., ROCHA, P. **Estudos sobre Dielétricos II**. An. Acad. Bras. Cien., tomo IX, n. 4, p. 309, 1937
- [24] GROSS, B. Eletret Research – Stages in its Development. **IEEE TEI**, vol. EI-21, n. 3, p. 249-269, June 1986.
- [25] JUNG, J.; PATSCH, R.; KAMENKA, D. Return Voltage – a Reliable Diagnosis for Water Treed Cables? **Conf. on Elect. Insul. Diel. Phenomena**. Texas, EUA, vol. 2, p. 626-629, Oct. 1999.
- [26] MORSHUIS, P.H.F. et al. Recovery Voltage Measurements on XLPE Cables. **Conf. on Elect. Insul. Diel. Phenomena**. Texas, vol. 2, p. 568-572, Oct. 1999.
- [27] KAMENKA, D. Non-Destructive Test Method for Assessing Damage due to Water TreeFormation in PE/XLPE Insulated Cables. <http://www.kmt.de/english/index.htm>, acesso e impresso em 2005.
- [28] PATSCH, R., JUNG, J. Improvement of the Return Voltage Method for Water Tree Detection in XLPE Cables. **International Symposium on Elect. Insulation**, p. 133-136, Anaheim, USA, April 2000.
- [29] NÉMETH, E. Measuring Voltage Response: a Non-destructive Daignostic Test Meted of HV Insulation. **IEEE Proc.-Sci. Meas.Technology**, vol. 146, n. 5, p. 249-252, 1999.
- [30] YOSHINO, K. et al. Residual Voltage in Polyethylene. **Jap. Journal of App. Physics**, v. 21, n. 9, p. 1333-1336, Sept.1982.
- [31] YAMANAKA, S. et al. Residual Voltage in Low-Density Polyethylene Film Containing Antioxidant. **Jap. Journal of App. Physics**, v. 23, n. 6, p. 741-747, June, 1984.

-
- [32] SILVA, G.C. **Comportamento Elétrico e Dielétrico de Cabos de Potência Extrudados Utilizados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Paraná, 2000.
- [33] HAUR, Y. J. **Voltage Response Measurement on Underground Cable System**. Bachelor of Electrical Engineering Thesis. School of Information Technology and Electrical Engineering, The University of Queensland. October, 2002.
- [34] PISPIRIS, C.S. Cable Diagnosis – In-situ tests with returned voltage diagnosis method in Romania. **IEE CIRED**, Paper 1.49, 2001.
- [35] JONUZ, B. et al. Detection of Water Trees in Médium Voltage XLPE Cables by Recovery Voltage Measurements. **Conf. on Elect. Insul. Diel. Phenomena**, p. 355-358, 2000.
- [36] KOZLOVSKIS, A., ROZENKRON, J. Temperature Dependence of Return Voltage Characteristics. **IEEE Trans. Power Delivery**, vol. 14, n. 3, July 1999.
- [37] JONUZ, B. et al. Detection of Water Trees in Médium Voltage Cables by RVM, without reference measurements. **7th ICSD**. Eindhoven, The Netherlands, p. 504-507, 2001.
- [38] HOFF, G.; KRANZ, H. G. Correlation Between Return Voltage and Relaxation Current Measurements on XLPE Medium Voltage Cables. **High Voltage Engineering Symposium**, paper 5.102.S14, 1999.
- [39] TETTEX INSTRUMENTS. Polarization spectrum analysis for diagnosis of insulation systems. Manual of TETTEX Type 5461.
- [40] TETTEX INSTRUMENTS. Polarization spectrum – different transformer of different age. Capturado da internet em fev. 2005. [http://www. Haefely.com/measuring_diagnostics/rv_docu/ceidp98.pdf](http://www.Haefely.com/measuring_diagnostics/rv_docu/ceidp98.pdf).
- [41] SebaKMT. **Dielétric Diagnostic Instruments**. <http://www.sebakmt.com>, acessado e impresso em outubro 2005.
- [42] LEGUENZA E. L.; GIACOMETTI J.A.; ROBERT R. **Dielectric and Viscoelastic Properties of Cross-linked Polyethylene under Multi-stressing Conditions**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 11, n. 3, p. 406-417, 2004.